



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR.

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

IMPLEMENTACIÓN DE TX/RX LTE SIMPLE MEDIANTE SOFTWARE DEFINED RADIO

Autor: Manuel López Bravo

Tutor: Víctor P Gil Jiménez

Fecha: Septiembre 2018

A mis abuelos.

Agradecimientos.

Durante el transcurso de la carrera he pensado el momento en el que tendría que redactar el trabajo final de grado, pero nunca pensé que el momento en el que tenía que agradecer a todas aquellas personas que me han estado apoyando. Sin embargo, tengo que entender que ya es el momento, que en esta vida todo finaliza y que si unas etapas acaban es porque vienen otras que serán mejores.

Quiero agradecer a mis padres por estar siempre en los momentos importantes de mi vida y por los consejos que me han dado los cuales han sido de gran ayuda para mi vida universitaria. Este trabajo es fruto de lo que me habéis enseñado en la vida, a ser una persona honesta y entregada a su vocación por ello quería deciros que gracias estar siempre confiando en mí y haberme dado la oportunidad de realizar la carrera.

A mi hermana, por ser siempre para mí un ejemplo académico a seguir la cual sé que sin duda está orgullosa de que haya conseguido ser ingeniero como ella. Gracias por su paciencia, por preocuparse por su hermano, pero principalmente gracias por estar en el final de esta etapa.

A mi tutor Víctor, por hacer posible el desarrollo de este trabajo. Por brindarme su ayuda, paciencia y por estar siempre apoyándome según se ha ido realizando este trabajo.

A mis amigos, en especialmente Víctor, María y Juande los cuales han estado apoyándome tanto en los buenos y malos momentos durante mi estancia en la universidad. Nunca olvidaré las prácticas, los ratos de estudio en las salas de ordenadores y la obsesión con las palmeras de chocolate. Quiero destacar en este apartado a mi amigo Alberto el cual siempre ha estado apoyándome en el transcurso de la carrera. Gracias por tu paciencia, ayuda y ánimo.

A todas las personas que he conocido durante el transcurso de la carrera los cuales me han aportado de manera directa o indirectamente.

¡Gracias!

Resumen.

En este proyecto se implementa un sistema de comunicaciones móviles basado en la tecnología LTE (Long Term Evolution Advanced) a través del lenguaje de programación gráfico Labview, sobre dispositivos USRP (Universal Software Radio Peripheral). Estos dispositivos pertenecen al conjunto de dispositivos conocidos como Radio definido por software (SDR). La implementación de este proyecto se va a realizar en dos partes. En la primera parte, se desarrolla el software del sistema transmisor y receptor utilizando una modulación 4-QAM tal y como se encuentra en el archivo SimulacionLTE.vi. Una vez desarrollado, se concatenan en software ambos sistemas para analizar su funcionamiento.

En la segunda parte, la implementación se adapta el software del sistema de transmisión y recepción desarrollado en la primera parte a los dispositivos USRP con el objetivo de analizar su comportamiento en un entorno real.

Por tanto, analizando los resultados y las especificaciones implementadas del estándar LTE se puede afirmar que los dispositivos USRP son óptimos para implementar la tecnología móvil LTE debido a eficiencia, posibilidad de trabajar en diferentes modos de operación y la baja Tasa de Error de Bit.

Abstract.

In this project, a mobile communication system based on LTE (Long Term Evolution Advanced) technology will be implemented through the Labview graphic programming language, on USRP (Universal Software Radio Peripheral) devices. The USRP devices can be included in the set of devices which are known as Software Defined Radio (SDR). The implementation of this project will be carried out in two parts. In the first part, the software of the transmitter and receiver system is developed using a 4-QAM modulation as it is found in SimulacionLTE.vi file. Once this part is developed, both systems are concatenated in software in order to analyze their operations.

In the second part, the implementation adapts the software of transmission and reception system developed in the first part to the USRP devices in order to analyze their behavior in a real environment.

Therefore, analyzing the results and the implemented specifications of the LTE standard, it can be affirmed that the USRP devices are optimal to implement the LTE mobile technology due to the efficiency, the possibility to work in different operating modes.

Índice.

Resumen.....	5
Abstract.	6
Índice de figuras.....	10
Índice de tablas.....	12
Capítulo 1. Introducción.....	13
1.1 Motivación del Trabajo.....	13
1.2 Objetivos.....	15
Capítulo 2. Estado del arte.....	17
2.1 Introducción.....	17
2.2 Análisis de entorno del proyecto.....	17
2.3 Conclusiones.....	19
Capítulo 3. Tecnología LTE y herramientas de trabajo.....	20
3.1 Introducción.....	20
3.2 Tecnología LTE.....	20
3.2.1 Estructura de la trama LTE.....	21
3.2.2 Enlace Descendente (downlink).....	22
3.2.3 Enlace Ascendente (uplink).....	23
3.2.4 Arquitectura de la red LTE.....	24
3.3 Dispositivo Radio Definida por Software (SDR).....	25
3.3.1 Dispositivos USRP.....	26
3.4 Herramientas de prototipado.....	28
3.5 Conclusiones.....	28
Capítulo 4. Marco legislativo del proyecto.....	30
4.1 Introducción.....	30
4.2 Gestión del espectro.....	30
4.3 Principales actores en la gestión del espectro.....	32
4.3.1 Grupo global.....	32
4.3.2 Grupo regional.....	32
4.3.3 Grupo nacional.....	33
4.4 Marco legislativo dispositivo SDR.....	33
Capítulo 5. Implementación de la Simulación del software LTE.....	35
5.1 Introducción.....	35
5.2 Transmisor LTE.....	35
5.2.1 Generación mapa de símbolos.....	36

5.2.2	Asociación de bits a símbolos.....	37
5.2.3	Generar símbolos OFDMA.....	38
5.2.4	Inserción de símbolos de referencia.	38
5.2.5	Insertar protección contra interferencias en los umbrales del canal.	39
5.2.6	Conversión de frecuencia a tiempo.	41
5.2.7	Inserción prefijo cíclico y escalado.....	41
5.3	Receptor LTE.....	42
5.3.1	Detección del prefijo cíclico.....	42
5.3.2	Eliminar el prefijo cíclico.	44
5.3.3	Conversión de tiempo a frecuencia.	46
5.3.4	Eliminar protección contra interferencias en los umbrales del canal.....	46
5.3.5	Extracción de símbolos de referencia.	47
5.3.6	Estimación del canal.....	48
5.3.7	Asociación de símbolos a bits.	50
5.4	Especificaciones implementadas de la tecnología LTE.	51
Capítulo 6. Implementación del software LTE desarrollado sobre dispositivos USRP.....		52
6.1	Introducción.	52
6.2	Adaptación del transmisor LTE al dispositivo USRP.....	52
6.2.1	Abrir una sesión USRP.....	53
6.2.2	Configuración de sesión del dispositivo USRP.....	53
6.2.3	Escribir los datos en el canal.....	54
6.2.4	Clausurar una sesión USRP.....	55
6.3	Adaptación del receptor LTE al dispositivo USRP.....	56
6.3.1	Abrir una sesión USRP.....	57
6.3.2	Configuración de sesión del dispositivo USRP.....	57
6.3.3	Iniciar la recepción de datos.....	58
6.3.4	Leer datos del canal.	59
6.3.5	Detener la recepción.....	60
6.3.6	Clausurar una sesión USRP.....	61
Capítulo 7. Pruebas.....		62
7.1	Introducción.	62
7.2	Transmisión de valores numéricos.	62
7.2.1	Implementación en el transmisor LTE.....	62
7.2.1	Implementación en el receptor LTE.	63
7.3	Transmisión de texto.	64
7.3.1	Implementación en el transmisor LTE.....	64

7.3.2	Implementación en el receptor LTE.	65
Capítulo 8. Análisis de los resultados.		67
8.1	Introducción.	67
8.2	Análisis de resultados del primer entorno.	68
8.2.1	Transmisión de números constantes.	68
8.2.2	Transmisión de texto.	68
8.2.3	Conclusiones.	69
8.3	Análisis de resultados del segundo entorno.	70
8.3.1	Transmisión de números constantes.	70
8.3.2	Transmisión de texto.	71
8.3.3	Conclusiones.	72
Capítulo 9. Gestión del proyecto.		73
9.1	Introducción.	73
9.2	Implementación transmisor LTE.	73
9.3	Implementación receptor LTE.	73
9.4	Análisis socioeconómico.	74
9.5	Planificación y costes.	75
9.5.1	Organización del proyecto.	75
9.5.2	Costes del proyecto.	76
9.5.2.1	Coste de Personal.	76
9.5.2.2	Coste de equipos.	77
9.5.2.3	Coste de licencias.	77
9.5.2.4	Costes Indirectos.	77
9.5.2.5	Coste total.	78
Capítulo 10. Conclusiones.		79
10.1	Aspectos más reseñables.	79
10.2	Futuras vías de investigación.	80
Bibliografía y referencias.		81
Anexo I. Diccionario de acrónimos.		85
Anexo II. Project Summary.		88

Índice de figuras.

Ilustración 1: Penetración de la tecnología móvil en cada país.....	14
Ilustración 2: Usuarios de smartphone vis internautas.	14
Ilustración 3: Modulación OFDMA Y SC-FDMA.	21
Ilustración 4: Estructura General de la Transmisión LTE.....	22
Ilustración 5: Resource Block LTE.	22
Ilustración 6: Arquitectura Tecnología LTE.....	25
Ilustración 7: Arquitectura de un dispositivo Radio Definido por Software.....	26
Ilustración 8: Interfaces del dispositivo NI-USRP 2920.	27
Ilustración 9: Generación de mapa de símbolos.	36
Ilustración 10: Asociación de bits a símbolos.	37
Ilustración 11: Generación de símbolos OFDMA.	38
Ilustración 12: Inserción de símbolos de referencia.	39
Ilustración 13: Reducción de interferencia.	40
Ilustración 14: Conversión de frecuencia a tiempo.	41
Ilustración 15: Inserción de prefijo cíclico.	41
Ilustración 16: Algoritmo de detención Van de Beek.....	43
Ilustración 17: Eliminar el prefijo cíclico.	45
Ilustración 18: Conversión de dominio de tiempo a dominio de la frecuencia.....	46
Ilustración 19: Eliminar reducción de interferencia.....	47
Ilustración 20: Extracción de símbolos de referencia.	48
Ilustración 21: Estimación del canal.....	49
Ilustración 22: Conversor de símbolos a bits.....	50
Ilustración 23: Abrir una sesión USRP en el transmisor.	53
Ilustración 24: Configuración de la sesión del dispositivo USRP transmisor.....	54
Ilustración 25: Escritura de datos en el canal por el transmisor.	55
Ilustración 26: Clausurar una sesión USRP en el transmisor.	56
Ilustración 27: Abrir una sesión USRP en el receptor.	57
Ilustración 28: Configuración de sesión del dispositivo USRP receptor.....	58
Ilustración 29: Inicializar la recepción de datos.....	59
Ilustración 30: Lectura de datos en el canal de recepción.	59
Ilustración 31: Detener una sesión USRP en el receptor.	60
Ilustración 32: Clausurar una sesión USRP en el receptor.	61
Ilustración 33: Prueba transmisión de valores numéricos.	63
Ilustración 34: Prueba recepción de valores numéricos.	64
Ilustración 35: Prueba transmisor de texto.	65
Ilustración 36: Prueba receptor de texto.	66
Ilustración 37: Entorno de desarrollo de pruebas.	67
Ilustración 38: Simulación prueba 1 transmisión de números constantes.	68
Ilustración 39: Simulación prueba 2 transmisiones de texto.	69
Ilustración 40: Implementación en entorno real de la prueba 1 transmisión de números constantes sobre transmisorLTE.....	70

Ilustración 41: Implementación en entorno real de prueba 1 transmisión de números constantes sobre receptor LTE.	71
Ilustración 42: Implementación de la prueba 2 transmisiones de texto sobre transmisorLTE- USRP.	72
Ilustración 43: Implementación de la prueba 2 transmisiones de texto sobre receptorLTE-USRP.	72
Ilustración 44: Planificación del proyecto (Pert).....	75

Índice de tablas.

Tabla 1: Características del estándar LTE implementadas en el proyecto.	51
Tabla 2: Reparto de tareas de los miembros relacionados con este proyecto.	76
Tabla 3: Duración, asignación y coste de las actividades de este proyecto.	77
Tabla 4: Coste de equipos en este proyecto.	77
Tabla 5: Costes indirectos en este proyecto.....	78
Tabla 6: Coste total de este proyecto.	78

Capítulo 1. Introducción.

1.1 Motivación del Trabajo.

El nacimiento de la tecnología móvil tiene lugar con la aparición de la primera generación 1G [1] entre 1970 y 1980 la cual supuso una auténtica revolución, su función era estrictamente para voz y utilizaba una modulación analógica a través de conmutación de circuitos con una velocidad de transmisión entre 1kbps a 2,4 kbps sin embargo poco tiempo después esta tecnología no satisfacía la demanda de una sociedad cada vez más exigente ya que presentaba algunas limitaciones como malas comunicaciones de voz y problemas en el intercambio de celdas por ello propició en torno a los años 1980 y 1990, la aparición de la segunda generación 2G., La principal característica es la digitalización del servicio, esta generación presentaba sistemas más robustos que los anteriores, aquí se destaca la tecnología GSM (Global System for Mobile Communications) que operaba en las frecuencias 850 y 1900 MHz, la generación 2G permitió que el servicio de telefonía se volviera más popular ya que presentaba una velocidad de 14kbps a 64 Kbps para la transmisión de voz mediante conmutación de circuitos e incluía nuevos servicios como fax, SMS (Short Message Service) y datos, aunque esta última presentaba limitaciones, es por ello por lo que en torno a los años 2000-2001 apareció la generación 2.5G. Esta generación es más rápida que su predecesora con velocidades de 115kbps y mucho más óptima que las de generaciones pasadas ya que implementa conmutación de paquetes para la transmisión de datos. Se destaca algunas tecnologías reseñables como GPRS (General Packet Radio System) que trabaja en el rango de frecuencias 850 y 1900 MHz y EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution) que presenta velocidades de transmisión de datos mayores que GPRS.

Sin embargo, el aumento de los usuarios móviles y la necesidad por parte de la sociedad de servicios que sean mucho más rápidos condujo a la aparición de la generación 3G en torno al año 2002 y 2003, las tecnologías que se engloban en esta generación se caracterizan por las altas velocidades en la transmisión de datos entre 384Kbps a 2Mbps y nuevos servicios como llamadas de video, televisión móvil, aplicaciones de localización y acceso fijo inalámbrico a Internet. La tecnología que destacada en esta generación es UMTS (Universal Mobile Telephone Service) que opera en el rango de frecuencias de 8 a 2,5 GHz. La optimización de la tecnología 3G y el aumento creciente y constante de los usuarios móviles generó la aparición en el año 2010 de la generación 4G, esta generación presenta unas velocidades de transmisión de datos de 100Mbit/s para una alta movilidad y de 50Mbit/s para baja movilidad junto a nuevos servicios Ip, gestión de flujos múltiples de difusión y capacidad de itinerancia mundial entre las más destacadas. En esta generación se destaca la tecnología LTE (Long Term Evolution) que trabaja en el rango de frecuencias de 800 a 900MHz, esta tecnología es una evolución de las tecnologías anteriores GPRS/UMTS, es considerada como 4G pero no cumplía con los estándares de velocidad de transmisión requeridos hasta su actualización conocida como LTE Advanced (Long Term Evolution Advanced) que permitía una velocidad de

transmisión mayor de 1000Mbps cumpliendo con las velocidades fijadas por el estándar 4G. Por lo tanto, se puede afirmar que el rápido desarrollo de la tecnología móvil es debido al aumento creciente del número de usuarios lo que ha provocado en la actualidad que haya más móviles que personas en el mundo y que el modo de uso de los dispositivos es diferente cada año ya que está influenciado por factores muy volátiles tal y como se destaca en el informe sobre el uso de la tecnología móvil en España y en el mundo en 2018 elaborado por la empresa Ditrendia [2].

Este informe también indica que en el año 2018 el número de usuarios que utilizan tecnologías móviles es de 5.135 mil millones que equivale al 68 por ciento de la población del mundo donde se destaca algunos países como España el cual presenta un grado de penetración de uso de la tecnología móvil del 80 por ciento o Corea del Sur con un 84 por ciento.

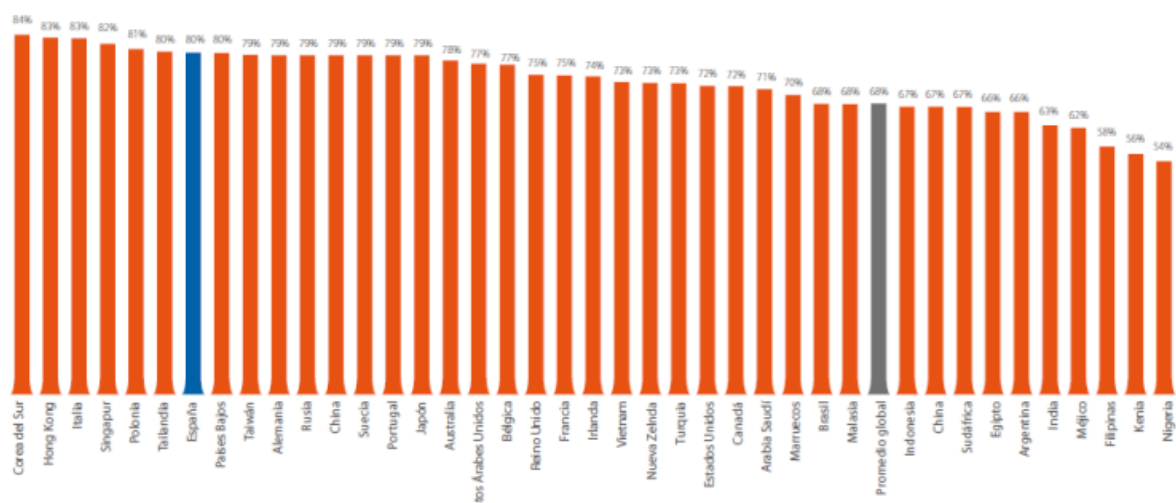


Ilustración 1: Penetración de la tecnología móvil en cada país.
Fuente: Informe Ditrendia Mobile en España y en el mundo 2018.

Centrándonos en España el informe destaca que el móvil es el dispositivo más utilizado frente a otros para el uso de ciertos servicios como internet con un 97 por ciento.

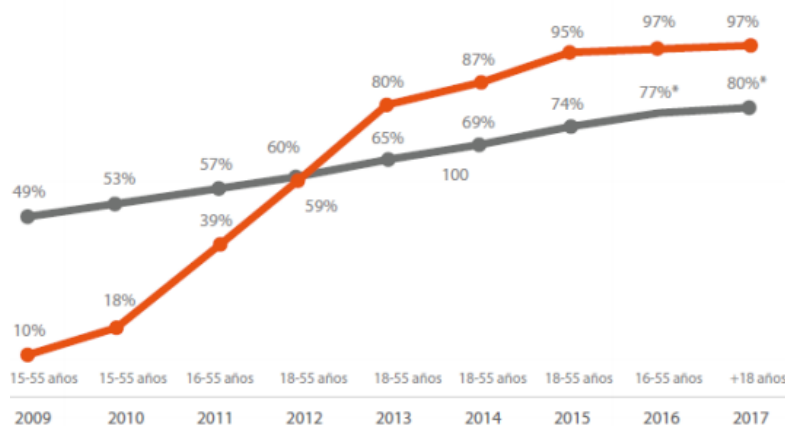


Ilustración 2: Usuarios de smartphone vis internautas.
Fuente: Informe Ditrendia Mobile en España y en el mundo 2018.

Por otro lado, se destaca el informe realizado por la asociación GSA (Global mobile Suppliers Association) [3] el cual indica que la tecnología LTE, tecnología que se va a implementar en este proyecto sobre dispositivos USRP, es utilizada por el 38.5 por ciento de los usuarios móviles. Este informe muestra a partir de los datos proporcionados por la empresa Ovum el crecimiento exponencial del número de suscriptores que utilizan esta tecnología ya que el número de suscripciones LTE en todo el mundo a fines de marzo de 2018 es de 3,200 millones en comparación con los 2,300 millones del año anterior.

En la actualidad las tecnologías móviles son más que un sistema de comunicación, es una puerta de acceso para el usuario al mundo. Estas tecnologías tienen una gran importancia ya que han revolucionado el ambiente social y laboral de las personas. Además, un estudio realizado por Google Consumer Barometer Report [4] el cual ha analizado para que utilizan los jóvenes menores de 25 años los dispositivos móviles han obtenido que el 93 por ciento de los jóvenes utiliza internet en el móvil ya sea para realizar compras, buscar información o para ver videos online. Esto hace a los jóvenes el principal motor para el desarrollo del mercado de las tecnologías móviles debido a que los dispositivos móviles son sencillos, fáciles de adquirir, precio asequible y la existencia de tarifas móviles ajustadas a diferentes tipos de nivel adquisitivo. Por último destacar las características que le aporta las nuevas tecnologías móviles a los dispositivos móviles permitiendo un acceso rápido al contenido que se requiere gracias a las velocidades de conexión que presenta la tecnología desarrollada haciendo que la comunicación sea más fácil.

1.2 Objetivos.

Teniendo en cuenta la situación actual en la que se encuentra el campo de las tecnologías móviles mostrado en el apartado anterior se va a exponer la finalidad de este proyecto. Este proyecto consta de la implementación de un transmisor y receptor basado en la tecnología LTE (Long Term Evolution) y que opere sobre dispositivos USRP.

Para la correcta realización de este proyecto se destacan una serie de objetivos que agrupan diferentes campos como el análisis del mercado, evaluación, implementación y desarrollo de pruebas de la propuesta. Estos objetivos son los siguientes:

- Estudio del entorno del que parte el proyecto y la definición las diferentes especificaciones teóricas que debe cumplir el proyecto explicado en el capítulo dos.

- Implementación del software transmisor y receptor basado en la tecnología LTE sobre el lenguaje de programación Labview explicado en el capítulo cuatro.
- Adaptación del software transmisor y receptor LTE a los dispositivos USRP explicado en el capítulo cinco.
- Realización de un conjunto de pruebas para el análisis del software desarrollado, explicado en el capítulo seis.
- Análisis de los resultados obtenidos de la realización de las pruebas, explicado a lo largo del capítulo siete.
- Estimación de costes y documentación del proyecto, explicado en el capítulo ocho.

La realización de este conjunto de objetivos ha permitido llegar con éxito al final de este proyecto consiguiendo obtener una serie de conclusiones finales sobre estas implementaciones de comunicación adaptados a dispositivos USRP explicadas en el capítulo nueve de este documento.

Capítulo 2. Estado del arte.

2.1 Introducción.

A continuación, se va a analizar el entorno del que parte este proyecto con el fin de obtener una concepción de que es lo que se ha conseguido implementar en el desarrollo de los sistemas de comunicación actuales y cuáles son las posibilidades en función de lo que ya hay investigado de conseguir con éxito los objetivos fijados en este proyecto., Los factores a tener en cuenta en este capítulo:

- Análisis de los diferentes enfoques existentes sobre el tema de este proyecto.
- Clasificación de información para la extracción de las ideas relevantes a partir de las cuales se realizará un análisis.
- Métodos de búsqueda de nuevas fuentes de información relacionadas con el proyecto.
- Generación de demanda de conocimiento. Impulsado por el establecimiento de comparaciones con el resto de conocimientos.

Estos factores definirán de forma completa el entorno del que se inicia este proyecto.

2.2 Análisis de entorno del proyecto.

El desarrollo exponencial del uso de la telefonía móvil hizo que se planteara no solo la optimización de los equipos móviles, sino también la infraestructura de red., Es aquí donde nació el proyecto OpenBTS [5] impulsado por David A. Burgess y Harvind S. Samra pertenecientes a la organización Kestrel Signal Processing. OpenBTS es un proyecto de código abierto que utiliza un software y hardware libre con la finalidad de crear una infraestructura que soporte los servicios de la tecnología móvil., Por lo tanto, utilizando un dispositivo de Radio definido por Software de hardware libre (USRP).

El equipo de David A. Burgess y Harvind S. Samra [6] consiguió realizar en entorno real varias pruebas con éxito al desplegar cobertura GSM haciendo uso de una antena y un dispositivo radio de hardware libre en un área aislada (Zambia) de cualquier tecnología que pueda interferir en el resultado. La investigación concluyó exponiendo que si es posible realizar llamadas con la tecnología GSM, sin embargo el funcionamiento eficiente del servicio de establecimiento de llamada dependía directamente con el ancho de banda, que en este caso era limitado.

También mencionar que las principales limitaciones que presentaba OpenBTS corresponden a que el sistema no es compatible con otras tecnologías como puede ser GPRS, UMTS o LTE, el correcto funcionamiento del sistema de comunicación dependerá de los dispositivos móviles utilizados debido a las restricciones del equipo y del espectro,

El sistema de comunicación diseñado no admite algunos servicios como roaming. Por ultimo no hay cesión de llamadas a otras estaciones base.

Sin embargo, también se destaca otra investigación orientada con la explicada anteriormente realizada por el Graduado en Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones por la Universidad Carlos III, Borja Genovés Guzmán [7], el cual implementó una estación base la cual implementa la tecnología GSM a través de un software implementado en el lenguaje de programación gráfico Labview y sobre dispositivos USRP. Las conclusiones que obtuvo de su implementación fueron que consiguió de manera satisfactoria desarrollar la transmisión de los canales en una estación base e implementar un sistema que permita configurar y controlar la estación base. Sin embargo, también resalta que utilizar los dispositivos SDR aunque reduzcan los costes de implementación presenta a veces una dificultad a la hora de gestionar el software.

Por otro lado, se destacan otras investigaciones donde se han desarrollado otros tipos de tecnologías móviles más avanzadas., Como la realizada por el Graduado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación por la Universidad Carlos III Alejandro Lancho Serrano, quien desarrolló en dispositivos USRP la tecnología UMTS a través del lenguaje de programación gráfico Labview. En su proyecto [8], pudo implementar un enlace de comunicación entre transmisor y receptor, así como la configuración de los parámetros necesarios para la transmisión., Esta investigación finalizó con un resultado satisfactorio ya que se pudo implementar con éxito los principales canales de downlink que forman parte del estándar UMTS. Por otro lado, no se pudo implementar la mayoría de los códigos de aleatorización, ni todos los subcanales que forman el canal DPCH y S-SCH. Esta investigación suscita un gran interés para la implementación de la tecnología LTE sobre USRP debido a que deja la puerta abierta a posibles mejoras.

Seguidamente, se destaca otra investigación sobre tipo de tecnologías como la realizada por la Graduada en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación Elena Al Khalaf Alvarez de la Universidad de Cantabria [9] en cuyo proyecto de investigación implementó en Matlab, y apoyándose en un software desarrollado por el Grupo de Tecnología Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de La Coruña (GTEC), una simplificación de receptor LTE sobre el dispositivo USRP B210. Con su trabajo, pudo comprobar el espectro de la señal OFDMA, así como el análisis de los diferentes parámetros involucrados en los modos transmisión de las operadoras de telecomunicaciones que trabajan en España. En dicho proyecto, llegó a la conclusión de que si se capturan señales en un entorno cercano a los e-NodeB es posible obtener parámetros más complejos pertenecientes a la transmisión debido a una buena relación SNR.

Otro trabajo analizado sobre la implementación de la tecnología LTE, es el realizado por la Graduada en Ingeniería de Telecomunicaciones por la Universidad Autónoma de Madrid. Andrea Sancho Fernández [10], en cuyo proyecto expone cual es la capacidad del enlace descendente en microceldas sobre autopistas con el objetivo de obtener que combinación entre tasa binaria y longitud de transmisión es más eficiente. El trabajo concluye de manera satisfactoria ya que consiguió obtener la capacidad y radio de la

microcelda de una estación base LTE sobre autopistas. Sin embargo, también este trabajo presenta ciertas limitaciones debidas a parámetros de infraestructura y entorno.

2.3 Conclusiones.

El análisis de cada uno de los trabajos analizados en el apartado anterior muestra cada una de las diferentes implementaciones de las tecnologías móviles, así como los objetivos que han conseguido desarrollar con éxito y aquellos donde han encontrado dificultades de desarrollo, ya sea por factores de limitación del dispositivo hardware, problemas a la hora de la realización de pruebas en entorno real o limitación por motivos de software. Las principales conclusiones que se pueden extraer de los trabajos previos es, que los lenguajes de programación Matlab y Labview son los más eficientes para implementar este tipo de sistemas de comunicación debido al número de librerías, su simplicidad y la capacidad que presentan.

Por otro lado, se puede afirmar que la mejor manera de realizar pruebas en entorno real es utilizando dispositivos de Radios definidos por software (SDR), y más concretamente los dispositivos USRP., Aunque estos dispositivos presentes sus limitaciones permiten el trabajo en múltiples modos de operación, reconfiguración y menor coste de desarrollo.

Finalmente, el desarrollo del transmisor y receptor LTE realizado en este proyecto permite establecer un sistema de comunicación más óptimo que los realizados en algunos proyectos citados en el apartado anterior, los cuales implementan la tecnología GSM o UMTS. También, completa el análisis realizado por otros proyectos sobre el desarrollo de la tecnología LTE. Evaluando el comportamiento conjunto de las funcionalidades del transmisor y receptor implementados sobre el mismo software. Evitando así, el análisis de una determinada función del estándar sobre uno de los dos sistemas (transmisor o receptor) únicamente. Es debido a que un determinado comportamiento de una funcionalidad del estándar afecta indirectamente al resto de funcionalidades de la tecnología LTE. Concluyo afirmando que la implementación presentada en este proyecto es especialmente atractiva ya que permite observar cuales son las mejoras realizadas respecto a tecnologías predecesoras y analizar hasta donde se puede implementar de manera eficiente la última tecnología LTE evaluando las funcionalidades conjuntas del estándar en el recepción y transmisor.

Capítulo 3. Tecnología LTE y herramientas de trabajo.

3.1 Introducción.

Para poder comprender el objetivo de este proyecto es necesario conocer una serie de conceptos que se van a desarrollar a lo largo de este documento y responderán a las siguientes preguntas:

- ¿Qué es la tecnología LTE?
- ¿Qué se entiende por dispositivo Radio Definida por Software?
- ¿Qué es un dispositivo USRP?
- ¿Cómo se puede implementar la tecnología LTE sobre los dispositivos USRP?

Todas estas preguntas presentadas, son a causa de la optimización y digitalización de los servicios tradicionales analógicos. Aquí se puede mencionar el teléfono móvil, cuya evolución, impulsada por las necesidades de la sociedad, hizo que se convirtiera en equipos computacionales más pequeños, formados por software más eficiente y con nuevos servicios.

3.2 Tecnología LTE.

La creciente demanda de una mayor velocidad de transmisión fue lo que impulso el desarrollo de la tecnología LTE [11] y [12], aunque también tuvieron influencia otros acontecimientos, como la bajada de los costes y la necesidad de competir con otras tecnologías como WIMAX.

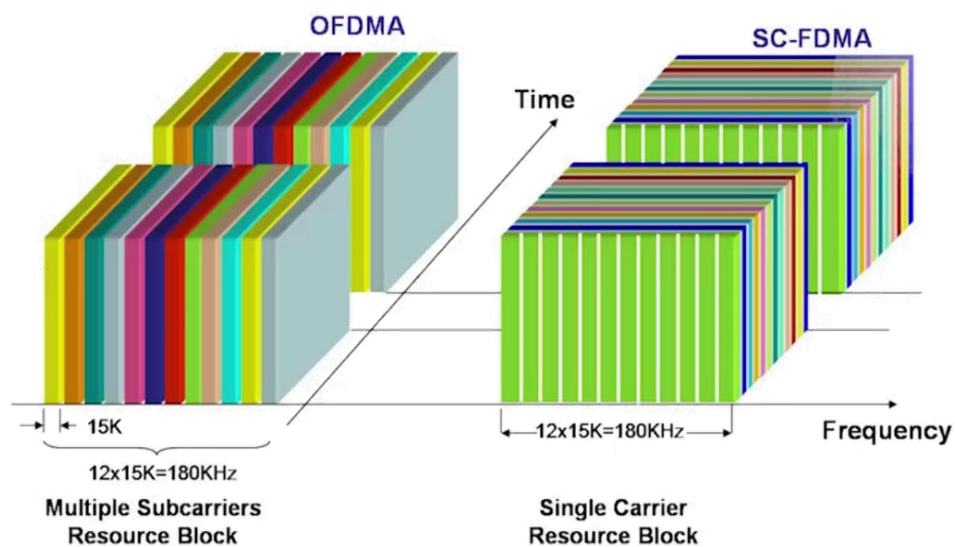
Entrando en el concepto de Tecnología LTE (Long Term Evolution) podemos afirmar que es un estándar de comunicaciones realizado por el 3GPP (3rd Generation Partner Ship Project). Esta tecnología parte con la finalidad de:

- Aumento del thouthput:
 - 100Mbit/s downlink y 1Gbit/s uplink.
 - Reduction de la latencia.
 - Mayor rendimiento en el borde del cluster.
- Ser compatible con las antiguas generaciones GSM/EDGE/UMTS.
- Incrementar la calidad de servicio.
- Permitir una mayor movilidad.

En cuanto a la modulación empleada, distinguimos dos tipos para cada uno de los enlaces (uplink y downlink). En el enlace downlink se utiliza la modulación OFDMA

(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access). Este tipo de modulación comparte el espectro con diferentes usuarios en el mismo tiempo de transmisión. La principal ventaja que presenta, es el aumento de la eficiencia espectral incorporando múltiples portadoras en el mismo espacio.

Para el enlace uplink se utiliza la modulación SC-FDMA (Single Carrier-FDMA) esta modulación se caracteriza por que permite utilizar todo el espectro solo a un usuario en el mismo tiempo, algunas ventajas de la SC-FDMA frente a la modulación downlink es una baja PAPR (peak-to-average power ratio) en la transmisión lo que permite ahorro de batería para dispositivos móviles.



*Ilustración 3: Modulación OFDMA Y SC-FDMA.
Fuente: Curso de trabajo para redes de computadoras II.*

3.2.1 Estructura de la trama LTE.

Acorde a la definición proporcionada en [11], las tramas LTE están formadas por un conjunto de elementos llamados Physical Resource Block (PRB). Las principales características que debe cumplir la trama LTE:

- Cada trama tiene una duración de 10ms y está compuesta por 10 subtramas.
- Cada subtrama posee una duración de 1ms de transmisión y contiene 2 slots.
- Cada slot, de 0.5ms de duración, contiene un número N “resource blocks” [$6 < N < 110$] en función del ancho de banda y recursos disponibles.
- Un Resource Block (RB) de 0.5ms de duración, está formado por 12 subportadoras por cada símbolo OFDMA en frecuencia.

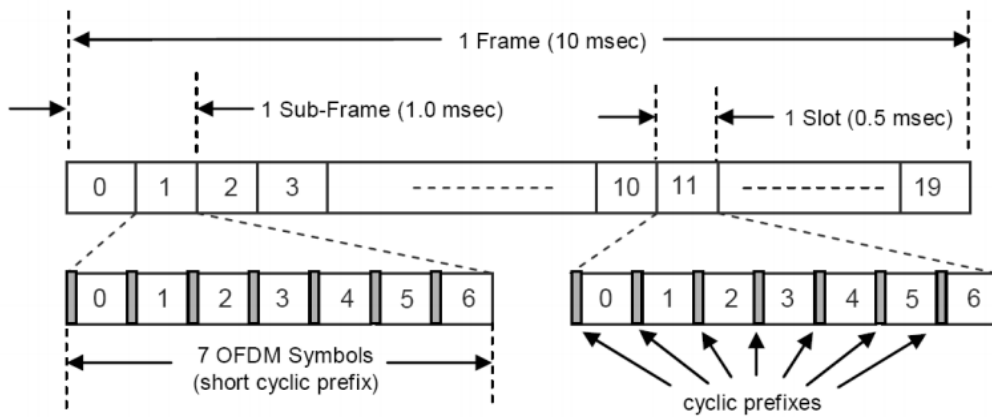


Ilustración 4: Estructura General de la Transmisión LTE.
Fuente: Universidad Politécnica de Madrid.

Por otro lado, los Resource Block están formados a su vez por Resource Element. Estos elementos, corresponden la unidad más pequeña para asignación de recursos., En la ilustración 5, podemos verlo en función del tiempo y la frecuencia.

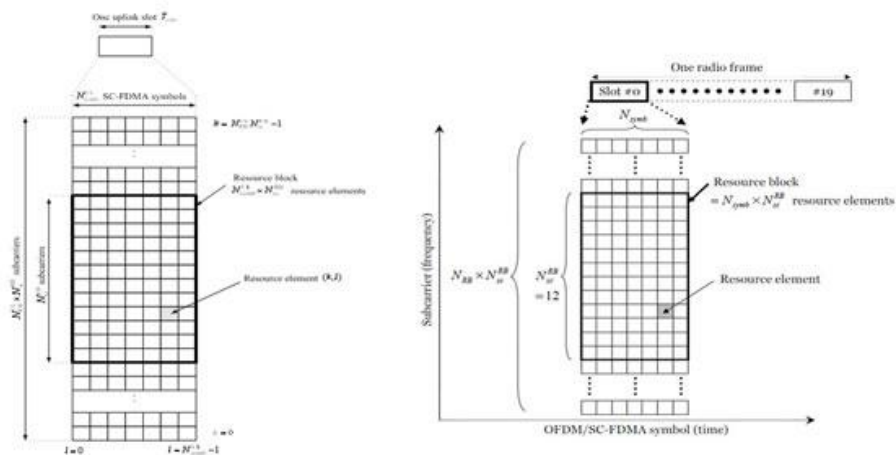


Ilustración 5: Resource Block LTE.
Fuente: Coursework for Computer Networks II.

3.2.2 Enlace Descendente (downlink).

Acorde a [11] y [12], el enlace descendente o downlink, el cual se corresponde a la comunicación desde eNodeB hasta el usuario, está formado por los siguientes canales, mecanismos de señalización y control.

- Señales de referencia: Este tipo de señales se utilizan para predecir la cobertura de la celda asociada al eNodeB. Se sitúan en un conjunto de Resource Elements con una separación mínima de 6 subportadoras., Se utilizarán dos señales de referencia para cada Resource Block., Reciben el nombre de señales de referencia primaria (RSP) y se encuentran en el primer símbolo de una ranura temporal (TS). En el caso de se requiera se puede

utilizar un segundo grupo de señales de referencia secundarios (RSS), localizadas en el quinto símbolo de una ranura temporal (TS).

- **Timing and Sampling:** Utilización de los algoritmos FFT/IFFT para obtener un canal que favorece la convolución circular. Se inserta el prefijo cíclico con el objetivo de conseguir que la señal transmitida sea equivalente a la convolución circular, este proceso se realiza copiando las últimas muestras y añadiéndolas al principio de la secuencia de transmisión en tiempo.
- **Canal de sincronismo:** Distinguimos dos tipos de canales PSS y SSS para el sincronismo del sistema de transmisión y de recepción.
- **Canales físicos de tráfico:** Podemos distinguir diferentes tipos.
 - **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH):** Se asigna cuando el usuario tiene que recibir información de usuario, no es un canal dedicado.
 - **Physical Multicast Channel (PMCH):** Transmite información MBMS (Multimedia Broadcast and Multicast System).
- **Canales físicos de Control:** Podemos distinguir diferentes tipos.
 - **Physical Broadcast Channel (PBCH):** transmite información básica sobre la red. Permite la conexión de un terminal móvil a la red.
 - **Physical Downlink Control Channel (PDCCH):** Transporta información relacionada con la asignación de recursos.
 - **Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH):** Informa sobre el número de símbolos requeridos en el PDCCH.
 - **Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH):** Transmite ACK/NACK por consecuencia de la recepción de información del canal ascendente.

3.2.3 Enlace Ascendente (uplink).

En lo que respecta al uplink como indica [11] y [12] (comunicación desde el usuario hasta el eNodeB), los principales canales y, mecanismos de señalización y control utilizados:

- **Señales de referencia:** Distinguimos dos tipos de señales de referencia.
 - **Modulation Reference Signal (DM-RS):** Estimación de la respuesta del canal de transmisión al impulso.
 - **Sounding Reference Signals (SRS):** Analizan la calidad de transmisión de información.
- **Mecanismo de Avance Temporal (Time Advance):** Se encarga de que las transmisiones realizadas en el enlace ascendente por los diferentes usuarios de una trama no interfieran entre sí.
- **Canales físicos de control:** Podemos distinguir diferentes tipos.
 - **Physical Uplink Shared Channel (PUSCH):** Transmite información de usuario y de gestión (niveles superiores al nivel físico).

- Physical Uplink Control Channel (PUCCH): Transporta información de control perteneciente al enlace ascendente, así como la transmisión de ACK/NACK de la información recibida por el enlace descendente.
- Physical Random Access Channel (PRACH): Envío de preámbulo para el inicio de conexión por parte del usuario, canal aleatorio.

3.2.4 Arquitectura de la red LTE.

La arquitectura tecnología LTE establecida por el 3GPP en [11] se ha diseñado marcando como objetivos la agrupación de las diferentes redes de acceso y la optimización de servicios. [12] Esta arquitectura está formada por un conjunto de elementos donde se encuentra el equipo de usuario o UE. Estos, dispositivos acceden a la red a través de “Evolved Radio Access Network (EUTRAN).

Por otro lado, se menciona el elemento eNodeB, el cual se encarga de gestionar las funciones realizadas en la interfaz radio, así como el control de los dispositivos conectados. Este elemento también permite el acceso a otras redes.

Todo el sistema radio (EUTRAN) está controlado por el EPC (Evolved Packet Core) formado por elementos de control y clasificación, distinguimos dos tipos:

- Panel de control: Está formado por los siguientes elementos.
 - MME (Mobility Management Entity): Gestiona la movilidad entre los diferentes nodos y controla la señalización de la comunicación.
 - HSS (Home Subscriber Server): Base de datos que recoge la información de los usuarios inscritos.
- Panel de usuario: Está formado por los siguientes elementos.
 - PCRF (“Policy and Charging Rules Function”): Implementación de políticas y servicios de la red (calidad de servicio y tarifas).
 - SGW (Serving Gateway): Estudio de las políticas de conexión establecidas por el PCRF para la administración de los servicios. Controlado por el MME.
 - (PDN Gateway, “Public Data Network Gateway”): Proporciona conexión al UE (User Equipment) con otras redes ajenas.

Todos estos elementos explicados están interconectados entre sí mediante una serie de interfaces, siendo las más reseñables:

- S11: - Conecta Evolved Radio Access Network y Serving Gateway.
- S5: - Crea un túnel de usuario entre Serving Gateway y PDN Gateway.
- S6a: - Permite la transferencia de datos de suscripción, entre Mobility Management Entity y Home Subscriber Server.
- S1-MME: - interconexión entre Evolved Radio Access Network y Evolved Radio Access Network, también es el punto de referencia del plano de control.

- S1-U: - Interconexión entre Evolved Radio Access Network y Serving Gateway. Referencia para la tunelización del plano de usuario y la conmutación en el eNodeB.
- Rx: - Interconexión entre la entrada a otra red y el Policy and Charging Rules Function.
- X2: Interconexión entre los diferentes eNodeB.
- Gx: Interconexión entre PDN Gateway y Policy and Charging Rules Function.

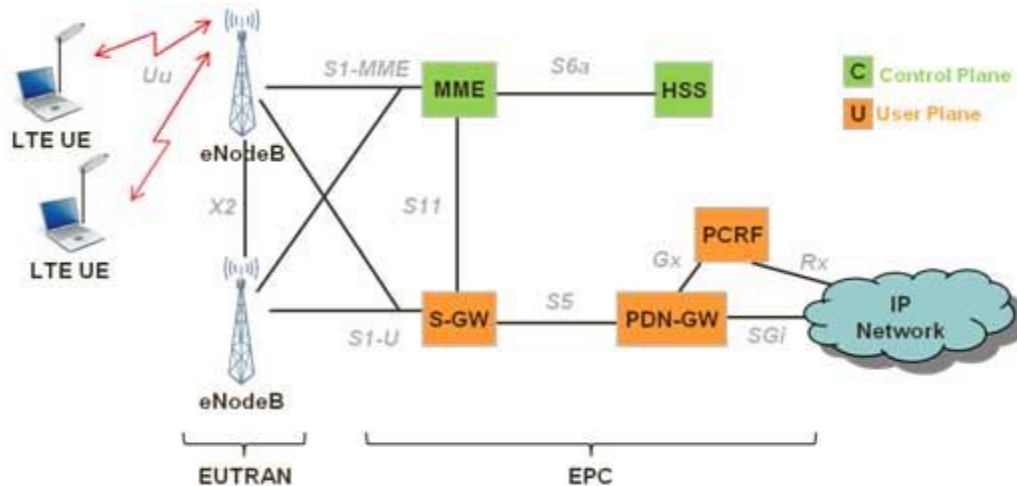


Ilustración 6: Arquitectura Tecnología LTE.
Fuente: Tutorial LTE.

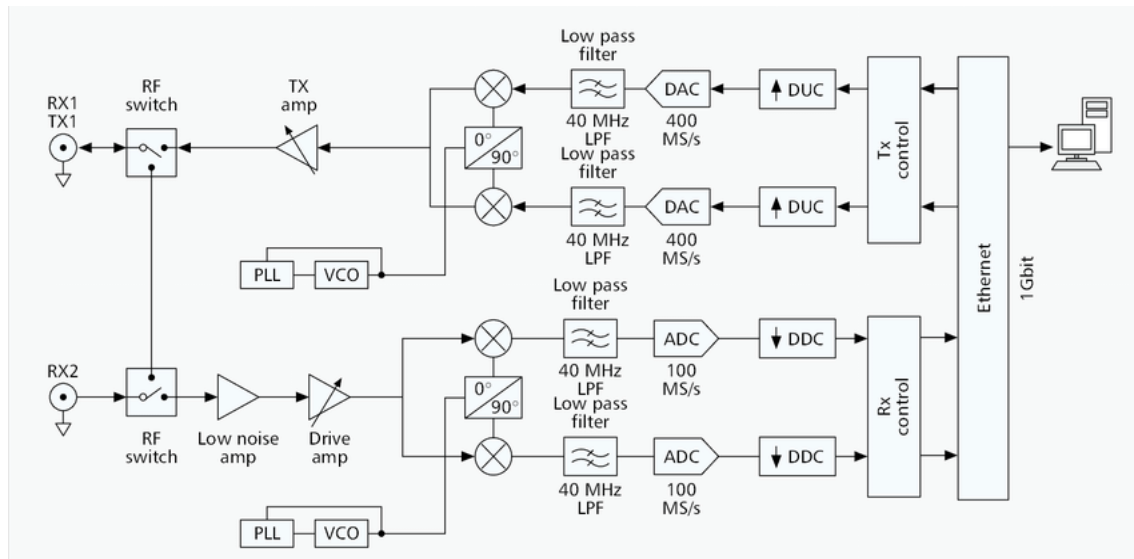
3.3 Dispositivo Radio Definida por Software (SDR).

Se conoce como Radio Definida por Software o SDR a equipos de radiofrecuencia utilizados principalmente para la implementación de sistemas de comunicación que presentan elementos desarrollados en software en lugar que en hardware. Algunos elementos son moduladores, demoduladores, conversores o filtros. [13]. Estos equipos surgieron en torno a los años 90 cuando Joseph Mitola III empezó a investigar sobre un nuevo concepto de computadores de radiocomunicación que desembocó en la aparición de dispositivos de radio definidos por software [14]. La principal característica de los dispositivos SDR es que permite recibir y transmitir información de diferentes canales en el mismo intervalo de tiempo, identificando el flujo de datos asociado a cada conexión y permitiendo realizar múltiples tareas.

Las principales ventajas de los dispositivos SDR:

- Diferentes modos de operación.
- Reconfiguración de los dispositivos.
- Entorno más eficiente.

Hay que reseñar que el dispositivo SDR está formado por un ordenador equipado con una tarjeta de sonido o un convertidor analógico digital.



*Ilustración 7: Arquitectura de un dispositivo Radio Definido por Software.
Fuente: Demostración de los desafíos prácticos de las comunicaciones inalámbricas usando USRP.*

Dentro de los dispositivos definidos como Radio Definida por Software podemos reseñar FlexRadio, Spectrum y USRP. Este último dispositivo es el utilizado para implementar el objetivo de este proyecto.

3.3.1 Dispositivos USRP.

El dispositivo Universal Software Radio Peripheral (USRP) [15] fue desarrollado por Matt Ettus. Este dispositivo, consiste en un equipo de comunicaciones el cual presenta un software capaz de transmitir y recibir señales en distintas bandas de frecuencia. Esto es debido a que este dispositivo está formado por un conjunto de circuitos que permiten convertir el dispositivo en diferentes tipos de sistemas de comunicación como estaciones de telefonía móvil, Bluetooth u otros tipos. Los USRP fueron diseñados para tener accesibilidad a través de un software abierto, estos equipos están formados principalmente por una placa base donde operan algunos sistemas como sincronización de reloj, FPGA, DAC, ADC, filtros, controladores de potencia y procesador USRP.

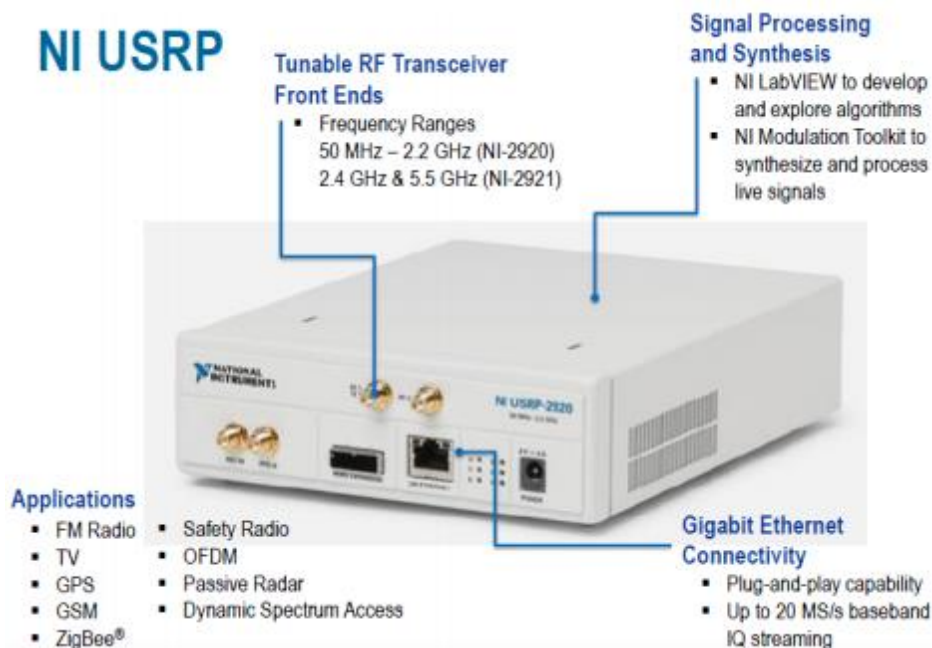


Ilustración 8: Interfaces del dispositivo NI-USRP 2920.

Fuente: Universidad Politécnica de Valencia, Diseño y montaje de una estación de seguimiento de satélite en órbita baja.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizará NI USRP2920 cuyas principales características son las siguientes [16]:

- Transmisor
 - Rango de frecuencias 50 MHz a 2.2GHz.
 - Frecuencia de paso menor de 1kHz.
 - Máxima potencia de salida.
 - 50MHz a 1.2GHz una potencia 50mW a 100mW.
 - 1.2GHz a 2.2GHz una potencia 30mW a 70mW.
 - Rango de ganancia 0 a 31 decibelios.
 - Ganancia de paso 1.0 decibelios.
 - Ancho de banda máximo instantáneo en tiempo real.
 - 16-bit anchura de la muestra, 20MHz.
 - 18-bit anchura de la muestra, 40MHz.
 - Velocidad máxima de muestreo I / Q.
 - 16-bit anchura de la muestra, 25MS/s.
 - 18-bit anchura de la muestra, 50MS/s.
 - Convertidor digital a analógico, 400MS/s, 8bit.
- Receptor.
 - Rango de frecuencias 50 MHz a 2.2GHz.

- Frecuencia de paso menor de 1kHz.
- Rango de ganancia 0 a 31.5 decibelios.
- Ganancia de paso 0.5 decibelios
- Máxima potencia de salida 0 milidecibelios.
-

3.4 Herramientas de prototipado.

Podemos distinguir diferentes lenguajes de programación para la implementación de este proyecto, entre algunos de ellos se distinguen Matlab y Labview.

Mencionando los aspectos relevantes de cada uno de ellos podemos iniciar hablando de Matlab, el cual es un software que permite adaptarse a las necesidades que requieren los procesos de investigación mediante análisis u optimización de funciones. Algunas ventajas que presenta este software es el gran soporte matemático dando lugar a resultados muy rigurosos, buena integración con dispositivos hardware o el gran nivel de paralelización de procesos. Sin embargo, también encontramos algunas desventajas como ciertos problemas de rendimiento o el uso de librerías graficas que provocan una alta dependencia del sistema operativo.

Por otro lado, destacamos Labview [17] el cual es un lenguaje de programación gráfico que hace uso de flujos de datos. De entre sus ventajas, distinguimos su fácil uso, debido a que permite realizar implementaciones que otros tipos de lenguajes de programación son aparatosos de una manera gráfica y sencilla, y a la posibilidad, de ejecutar de manera sencilla, múltiples tareas simultaneas Este lenguaje permite, también soportar distintos hardware sobre el mismo software y generar, automáticamente código a través de una interfaz fácil de manejar.

3.5 Conclusiones.

Analizando la evolución de las tecnologías móviles se puede observar que la tendencia ha sido hacia tecnologías más eficientes, con nuevos servicios y con mayor velocidad de transmisión. Por lo tanto, este proyecto se centra en la optimización de la tecnología LTE. Este tipo de tecnología aumenta considerablemente la velocidad de transmisión respecto a sus predecesoras permitiendo acceder rápidamente al contenido que se desee consultar gracias al aumento del ancho de banda, además de permitir la descarga de archivos en la mitad de tiempo que con la tecnología 3G.

Otras peculiaridades de esta tecnología es que consigue una menor congestión de la red y una reducción de latencia. Sin embargo, también se encuentra algunos inconvenientes como un mayor consumo de datos y que solo es posible encontrar este tipo de tecnología en zonas ampliamente comunicadas.

Estos problemas y muchos otros serán retos que tendrán que superarse en tecnologías futuras como la tecnología 5G [18], la cual tendrá mayor movilidad de dispositivos, conexiones de entre 100 y 1000 veces superiores a los 10 Gbps por segundo y una mayor nivel de conectividad . Esto permitirá impulsar el concepto de internet de las cosas.

Por otro lado, la aparición en el mercado de equipos capaces obtener y analizar rangos de frecuencias, ha permitido el desarrollo de todo tipo de sistemas radiofrecuencia implementados en software, entre los cuales se encuentran los dispositivos USRP, que como se ha mencionado en apartados anteriores, se caracterizan por utilizar el software libre donde se puede implementar la diferentes funcionales para implementar sensores o dispositivos de recepción/transmisión. Esto es debido a que el dispositivo nos permite trabajar en múltiples modos de trabajo, con un menor coste para el despliegue de la red y reconfiguración de los equipos, aunque es importante remarcar que estos dispositivos tienen limitaciones por el hardware.

Analizando las ventajas e inconvenientes de la tecnología LTE y del dispositivo USRP se puede mencionar que hay posibilidades de éxito para implementar LTE con el lenguaje de programación Labview sobre USRP. Es por este motivo por el cual se elige este lenguaje de programación para la implementación de este proyecto, porque permite hacer de manera simultánea diferentes tareas y trabajar en diferentes soportes hardware.

Capítulo 4. Marco legislativo del proyecto.

4.1 Introducción.

Este proyecto tiene una serie de aspectos que dependen de la gestión otras entidades. En este caso destaca el uso del espectro ya que constituye la materia prima con la que se construyen los servicios de comunicaciones. [19] Cuando se habla de uso de espectro se está hablando del derecho a poder recibir y transmitir en un determinado rango de frecuencias de carácter temporal o indefinido. Actualmente las licencias tramitadas por parte del Gobierno de España para los operadores móviles se realizan mediante un estilo conocido como american way, este estilo consiste en subastar los derechos de uso del espectro en un área limitada de carácter indefinido tal y como lo recoge la Ley General de Telecomunicaciones aprobada el 11 de noviembre del 2014. Sin embargo, surgen una serie de preguntas que trataremos de dar respuesta en este capítulo:

- ¿Qué tiene el espectro que lo hace tan atractivo?
- ¿Qué nuevas ventajas nos ofrece el uso del espectro?
- ¿Hacia dónde evolucionará las tecnologías que utilizan el espectro?

Estas preguntas han impulsado un cambio profundo en la gestión del espectro que a su vez generará una evolución en las tecnologías hacen uso del espectro.

4.2 Gestión del espectro.

En cuanto al uso del espectro por parte de los operadores móviles se puede afirmar que se busca una buena relación entre capacidad y cobertura. [19] El operador implementa una serie de servicios donde interesa tener una buena capacidad del canal lo que equivale a un mayor número de usuarios y unos servicios mucho más atractivos, por otro lado, también se necesita tener buena cobertura ya que sino el número de estaciones base se incrementaría demasiado y por consecuencia los costes de infraestructura de red. Es por ello por lo que cada tipo de servicio requerirá una determinada porción de espectro para tener un comportamiento eficiente, sin embargo, el crecimiento exponencial de servicios por parte de los operadores ha generado competencia por el uso del espectro el cual es limitado. En áreas como Estados Unidos o Europa el desarrollo económico ha propiciado la aparición de un gran número de empresas que se pelean por la utilización de la misma porción de espectro. Para solucionar este problema se ha realizado la asignación de una forma conocida como “command and control”.

Este proceso de asignación consiste en un reparto estático del espectro que se basa en indicar que tipo de servicio o tecnología se debe desplegar en cada banda como por ejemplo el despliegue a la frecuencia de 900MHz de la tecnología GSM en Europa por parte de la Comisión Europea recogido en la Directiva 87/372/CEE [20]. Esta manera de asignación del espectro es fácil y cómoda, sin embargo, este escenario cambió debido a la evolución del factor técnico de la gestión del espectro que permitió la creación de normas de coexistencia y convivencia con el fin de que diferentes servicios puedan funcionar en bandas o territorios cercanos sin interferirse, es por ello por lo que se puede hablar de una misma tecnología desplegada por diferentes empresas en un mismo territorio solo que en diferentes canales como ocurre con los operadores móviles de España, también se puede implementar diferentes tecnologías en bandas contiguas para desplegar servicios móviles o incluso dos tipos de servicios distintos en bandas contiguas. Es por ello por lo que la asignación command and control de manera estática del espectro pertenece al pasado debido a dos razones.

- Vulnerable a inferencias, ya que puede bloquear el paso a tecnologías innovadoras.
- Deja el espectro en mano de gobiernos y grupos internacionales como la ITU o la CEPT.

Es por ello por lo que se evolucionó hacia un marco de flexibilidad en el que el mercado sea quien seleccione a los usuarios del espectro, siendo estos usuarios las empresas que necesitan el espectro para sus servicios tal y como indica el artículo 30 de La Ley General de Telecomunicaciones [20] aprobada el 11 de noviembre del 2014 establece un marco de garantía de acceso de todos los operadores al dominio público. Los titulares del dominio público quedan obligados a establecer el acceso en condiciones neutrales, objetivas, transparentes, equitativas y no discriminatorias, evitando que puedan otorgar un derecho preferente o exclusivo, tanto de acceso como ocupación, a un determinado operador o a una red de comunicaciones electrónicas en concreto. La presente ley evita que la ocupación o el derecho de uso de dominio público para la instalación o explotación de una red pueda ser asignada mediante procedimientos de licitación. Con el abandono de medidas como la establecida por la Comisión Europea donde asignó la tecnología GSM para incorporar el termino de neutralidad de la red con la modificación de la Directiva 87/372/CEE [21] el 16 de septiembre de 2009 con la aprobación por la Unión Europea de la Directiva 2009/114/CE del Parlamento Europeo [22]. Esta modificación permite los países miembros a instaurar sistemas que favorecen la competitividad por el uso del espectro como subastas o concursos, en nuestro caso en España se destaca la licitación mediante subasta económica pública para la frecuencia de los 800MHz y los 900MHz a través de lo establecido en el apartado 8 del artículo 4 y en los artículos 6 y 7 del Real Decreto 458/2011, de 1 de abril [23].

Las principales características de la gestión del espectro flexible o american way son las siguientes:

- Neutralidad Tecnológica: Recogida en su artículo 66.1 de la Ley General de Telecomunicaciones [20] del 11 de noviembre del 2014 habilita el uso de

cualquier tipo de tecnología empleada para los servicios de comunicaciones electrónicas que sea conforme al Derecho de la Unión Europea dentro de las bandas de radiofrecuencias declaradas disponibles para los servicios de comunicaciones electrónicas en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias.

- Neutralidad de Servicios: Recogida en el artículo 66.2 de la Ley General de Telecomunicaciones [20] del 11 de noviembre del 2014, se podrá prestar cualquier tipo de servicios de comunicaciones electrónicas dentro del marco establecido por el Derecho de la Unión Europea en aquellas bandas de radiofrecuencias disponibles para los servicios de comunicaciones electrónicas, según esté indicado en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias. Abrir no solo el uso de cualquier tecnología sino también de servicio.
- Asignación del espectro no licenciado: Recogido en el orden ETU/1033/2017 [24], de 25 de octubre, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias que trata sobre Asignación del espectro a los diferentes servicios contando porciones de espectro pequeñas para servicios libres y públicos que no pertenezcan a empresas.

4.3 Principales actores en la gestión del espectro.

En este apartado se destacan los principales organismos y entidades encargados de la gestión del espectro y las funciones que realizan. Aquí destacamos tres grupos global, regional y nacional [19]. De manera resumida se puede decir que el grupo local se encarga de establecer las pautas generales de la gestión del espectro a nivel mundial, el grupo regional establece particularidades partiendo de los estándares desarrollados por el nivel global y por último nivel nacional adaptan las particularidades desarrolladas por el grupo regional a las políticas de cada país.

4.3.1 Grupo global.

Dentro del grupo global [19] se debe mencionar Unión Internacional de Telecomunicaciones o UIT, esta organización de las Naciones Unidas actualmente se encarga de la coordinación global del espectro radioeléctrico. Distinguimos tres campos de operación reseñables.

- Desarrollo: Control del acceso a los sistemas de telecomunicaciones por parte de los países.
- Estandarización: Características de las redes de telecomunicaciones nivel global.

4.3.2 Grupo regional.

Se entiende como grupo regional [19] a un área del mundo coordinada bajo las mismas directrices, en este grupo se indica la Comisión Europea donde se destacan dos organismos complementarios.

- Radio Spectrum policy group (RSPG): Se encarga de realizar informes a la Comisión Europea sobre mejoras en la política y armonización del espectro, en esta organización se encuentran miembros de la CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations), entidad que se encarga establecer criterios no vinculantes pero relevantes para la gestión del espectro y el ETSI (European Telecommunications Standards Institute), entidad encargada de normalizar las tecnologías de comunicación en Europa.
- Radio Spectrum Committee (RSC), se encarga de dar apoyo a la Comisión Europea sobre implementación y armonización del espectro.

4.3.3 Grupo nacional.

En este grupo concretado a España [19] se destaca el Ministerio de Economía y Empresa y más específico la Secretaría de Estado para el Avance Digital Sociedad de la Información (SETSI), ambas se encargan de ajustar las características de técnicas y políticas para la gestión del espectro en el marco legislativo nacional. Por otro lado, se destaca el Cuadro Nacional de Asignación de Frecuencias (CNAF), el cual se encarga de la cesión de frecuencias en función del sistema en vigor.

4.4 Marco legislativo dispositivo SDR.

Una de las estructuras más usadas utilizadas para la implementación de comunicaciones de radio frecuencia son los equipos SDR o dispositivos de Radio definidos por software como se ha dicho en apartados anteriores son dispositivos que la mayor parte de sus componentes se implementan por software. Aunque estas herramientas en muchos casos son utilizadas como elemento de hacking, así lo demostró el investigador Samy Kamkar [25] utilizando uno de estos dispositivos para realizar un ataque de fuerza bruta a puertas de garaje transmitiendo diferentes combinaciones de claves. Sin embargo, la agrupación en rangos de frecuencias de ciertos servicios ha propiciado la aparición de diferentes equipos de hacking como el dispositivo RZUSBstick para ataques a redes ZigBee o Ubetooth One para comunicaciones Bluetooth. Actualmente los dispositivos SDR entre los que se pueden mencionar los dispositivos USRP pueden ser utilizados para actos delictivos como puede ser la interceptación de transmisiones de datos informáticos sin permiso, es por ello por lo que muchos países están cambiando su Código Penal [26] para sancionar este tipo de delitos, centrándonos más en nuestro entorno podemos destacar España donde destaca el artículo 197 del Código Penal vigente de 1995 (revisado en 2015) [27] castiga con pena de prisión de entre tres meses y dos años o multa de tres a doce meses toda interceptación no autorizada de transmisiones de datos informáticos no públicos cuyo

origen o destino es un sistema de información, a través de la utilización de artificios o instrumentos técnicos. Otros artículos del Código penal que denuncian el uso fraudulento de los dispositivos SDR u otros pueden verse en el artículo 248 del Código Penal [27] que persigue contra el fraude informático o el artículo 246 del Código Penal [27] que persigue contra el sabotaje informático.

Capítulo 5. Implementación de la Simulación del software LTE.

5.1 Introducción.

En este apartado se desarrollará el software del sistema transmisor y receptor concatenado en el archivo SimulaciónLTE.vi., A través del lenguaje de programación Labview. Se elige este lenguaje debido a que es un potente programa de desarrollo gráfico compuesto por un conjunto de algoritmos que permiten captar flujos de datos y aplicar sobre ellos diferentes tipos de funciones. Para el desarrollo de esta tecnología se utiliza una serie de funciones con las que se puede modificar los datos de manera sencilla. En este desarrollo se destacan dos partes, transmisor LTE y el receptor LTE. El transmisor LTE tiene como función generar un mapa de símbolos a partir de los parámetros de entrada que se proporcionen, más tarde se asocia a cada conjunto de bits de información un símbolo de la constelación de acuerdo a la modulación asignada por ejemplo 4-QAM, 16-QAM o 16-QPSK, luego se generan símbolos OFDMA a partir de la secuencia de símbolos originada por la asociación de los bits de información a símbolos seguidamente se insertan símbolos de referencia en la secuencia de símbolos que conforman el símbolo OFDMA. A continuación, se insertan símbolos nulos en los extremos de los símbolos OFDMA para evitar interferencias en los límites del canal, luego se realiza la transformada de Fourier para convertir la secuencia que contiene los símbolos de información y símbolos de referencia (frecuencia) en muestras de tiempo. Finalmente se inserta el prefijo cíclico, este proceso consiste en copiar las últimas muestras de tiempo perteneciente a la secuencia de la transformada de Fourier e insertarlas al principio de la secuencia y por último escalar la señal. Sin embargo, el receptor LTE tiene como funciones detectar el prefijo cíclico a través de la sincronización en tiempo, para ello se utiliza el algoritmo Van De Beek [28], luego se eliminan las muestras de prefijo cíclico de cada símbolo OFDMA más tarde se eliminan los símbolos nulos que se han insertado en los extremos de cada símbolo OFDMA. Continuación se extraen los símbolos de referencia que se han introducido en los símbolos OFDMA, seguidamente se evalúa la posible modificación realizada por el canal y se genera una secuencia que sumada a la secuencia de símbolos corrija las posibles alteraciones del canal, finalmente se obtiene los bits de información asociados a cada símbolo en función del mapa de símbolos generado por los parámetros de entrada proporcionados.

5.2 Transmisor LTE.

A continuación, se expone como se ha realizado la implementación de un transmisor LTE en el lenguaje de programación Labview así como las funciones utilizadas para ello.

5.2.1 Generación mapa de símbolos.

Para desarrollar el mapa de símbolos se va a utilizar la función de Labview MT Generate Symbol Map VI [29], esta función permite representar un mapa de símbolos con la arquitectura del modo que se seleccione (rectangular o circular) de acuerdo a las componentes I/Q. En esta implementación se ha seleccionado el modo rectangular generando un mapa de símbolos rectangular para la asignación de bits a símbolos a partir de los parámetros de entrada introducidos por el usuario.

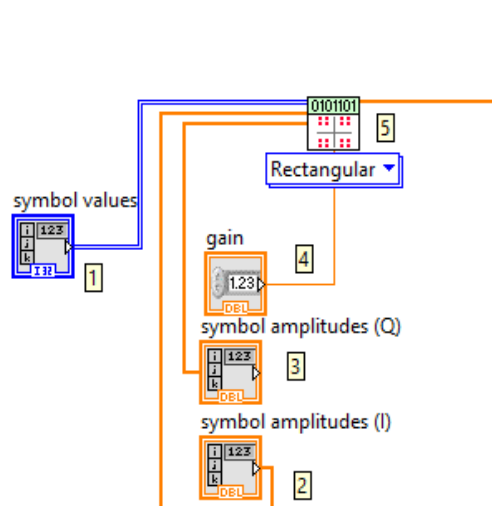


Ilustración 9: Generación de mapa de símbolos.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas implementadas en la función son las siguientes.

- Entradas:
 - 1- symbol values: Es la matriz de enteros utilizada para la asignación de los datos binarios a los símbolos (I/Q).
 - 2- symbol amplitudes (I): Matriz que indica la amplitud de la cuadratura de fase de los elementos de la constelación.
 - 3- symbol amplitudes (Q): Matriz que indica la amplitud de la cuadratura de fase de los elementos de la constelación.
 - 4- gain: Constante para escalar el mapa de símbolos.
 - 5-error: Gestiona los posibles errores o avisos de la implementación.
- Salidas:
 - 6- symbol map: retorna un conjunto de parámetros en los que se encuentra mapa de símbolos generado a partir de las diferentes entradas de la función.

5.2.2 Asociación de bits a símbolos.

Para continuar el proceso de transmisión de datos en función del estándar de la tecnología LTE se utiliza la función Map Bits to Symbols [29]. Esta función permite asociar a un conjunto de bits a un determinado símbolo complejo en función de la modulación asignada como por ejemplo PSK, ASK, CPM o QAM. En esta implementación se utiliza una modulación QAM o modulación en amplitud de cuadratura, este tipo de modulación tiene una mayor inmunidad frente al ruido, menor coste, presenta mejor calidad en la transmisión, mayor seguridad en la transmisión y compatibilidad con múltiples plataformas de servicios digitales, también mencionar que se asigna 2 bits por símbolo QAM para simplicidad a la hora de generar el mapa de símbolos (modulación 4-QAM).

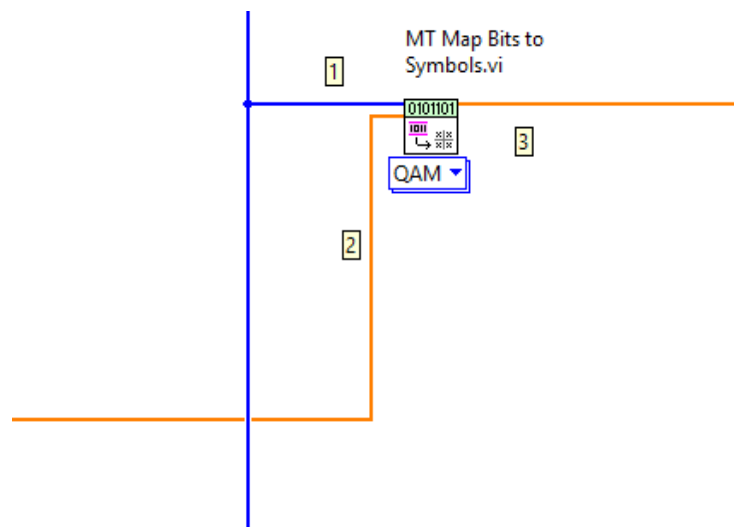


Ilustración 10: Asociación de bits a símbolos.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas en esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1-input bit stream: Secuencia de bits de información para asignar a símbolos.
 - 2-symbol map: Conjunto de parámetros donde se encuentra el mapa de símbolos para asignar a la secuencia de bits.
- Salidas:
 - 3-Symbols: Retorna la secuencia de símbolos asignados a la secuencia de bits de información.

En esta implementación se trabaja con 375 usuarios que generan entre toda una secuencia de bits de información de 3000bits, convertida a símbolos equivale a una secuencia de 1500 símbolos.

5.2.3 Generar símbolos OFDMA.

Seguidamente se generan los símbolos OFDMA utilizando la función Reshape Array Function [29], esta función procesa la secuencia de entrada y genera una matriz con el número de columnas y filas indicadas por parámetro de entrada. Para esta implementación se introduce como parámetros de entrada 125 y 12 a fin de que la función retorne una matriz (12x125) que contenga 12 símbolos OFDMA 125 símbolos cada uno.

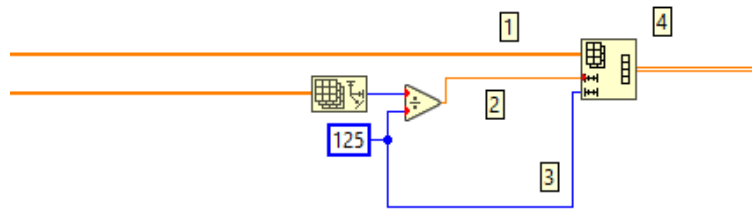


Ilustración 11: Generación de símbolos OFDMA.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas en esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1- n-dim array: Secuencia de símbolos a procesar.
 - 2-dimension size: dimensiones de la matriz de salida.
- Salidas:
 - 3-m-dim array: Retorna una matriz a partir de los datos de la secuencia de entrada a partir de las dimensiones indicadas por parámetro de entrada.

5.2.4 Inserción de símbolos de referencia.

A continuación, y con el objetivo de estimar en el receptor las posibles alteraciones que puede provocar el canal en los símbolos OFDMA se inserta símbolos de referencia entre los 125 símbolos de información que conforman el símbolo OFDMA. Para ello se utiliza la función Decimate 1D Array Function [29], esta función divide los

elementos de la secuencia de 125 símbolos que conforman un símbolo OFDMA y los retorna uno a uno recorriendo cada una de las cinco salidas generando una subsecuencia, seguidamente se utiliza la función Interleave 1D Arrays Function [28] que realiza lo inverso que la función anterior con el matiz que esta función tiene 6 entradas las 5 salidas de la función Decimate 1D Array Function [29] más una entrada adicional que presenta una secuencia de símbolos de referencia. Esta función recorre cada una de las entradas y retorna como salida una concatenación como secuencia.

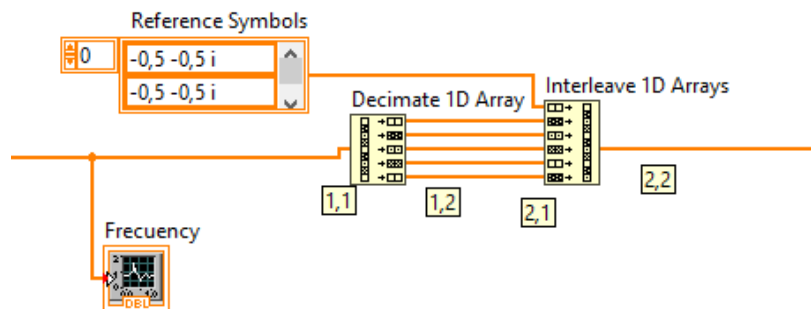


Ilustración 12: Inserción de símbolos de referencia.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

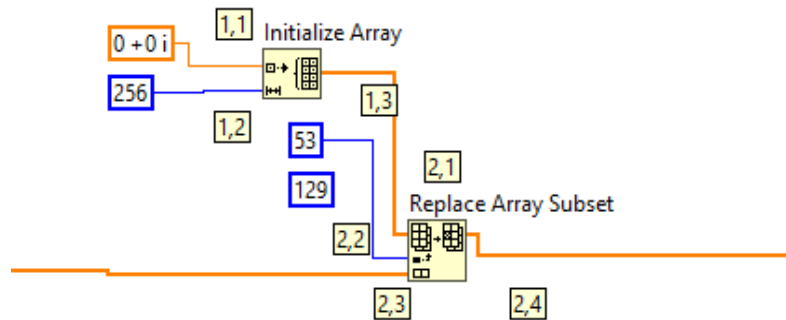
Las entradas y salidas en estas funciones son las siguientes:

- Función Decimate 1D Array Function.
 - Entradas:
 - 1.1- array: Secuencia de símbolos que forman un símbolo OFDMA.
 - Salidas:
 - 1.2- elements: Cada una de las salidas por las que se retornarlas subsecuencias de elementos, cinco salidas.
- Interleave 1D Arrays Function.
 - Entradas:
 - 2.1-array: Subsecuencia de símbolos alterados, seis entradas.
 - Salidas:
 - 2.2- interleaved array: Retorna como salida la concatenación de las subsecuencias de entrada.

5.2.5 Insertar protección contra interferencias en los umbrales del canal.

Para reducir la interferencia en los límites del canal de transmisión se inserta en cada uno de los extremos de los símbolos OFDMA un conjunto de símbolos nulos haciendo uso de las funciones Initialize Array y Replace Array Subset [29]. La función Initialize Array crea una secuencia de acuerdo al tamaño y el contenido que se le

introduce por parámetro de entrada, en esta implementación se genera una secuencia de símbolos nulos de tamaño 256, seguidamente la función Replace Array Subset reemplazara los elementos de una secuencia secundaria en otra secuencia primaria indicando por parámetro la posición inicial de reemplazamiento, en este caso se reemplaza a partir de la posición 53 a la 128 de la secuencia de símbolos nulos(secuencia primaria) por la secuencia que forma el símbolo OFDMA(secuencia secundaria).



*Ilustración 13: Reducción de interferencia.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

Las entradas y salidas que tienen estas funciones son las siguientes:

- Initialize Array Function.
 - Entradas:
 - 1.1- element: Valor que contiene la secuencia de salida.
 - 1.2- dimensión size: Valor que indica el tamaño de la secuencia de salida.
 - Salidas:
 - 1.3- initialized array: Retorna una secuencia de salida con el tamaño indicado por parámetro e inicializado al contenido indicado.
- Replace Array Subset Function.
 - Entradas:
 - 2.1- n-dimension array: Secuencia primaria a reemplazar elementos.
 - 2.2- index: Posición inicial de reemplazamiento en la secuencia n-dimension array.
 - 2.3- new element / subarray: Secuencia secundaria con elementos a reemplazar en n-dimension.
 - Salidas:
 - 2.4-output array: Retorna una secuencia con elementos de la secuencia primaria reemplazados por los elementos de la secuencia secundaria.

5.2.6 Conversión de frecuencia a tiempo.

Para realizar la conversión de frecuencia a tiempo se utiliza la función FFT inverso VI [29]. Esta función realiza la transformación de Fourier inversa que consiste en cambiar de un entorno de frecuencia a tiempo y se puede utilizar en dos modos de operación real o complejo. En este caso se ha utilizado el modo complejo.

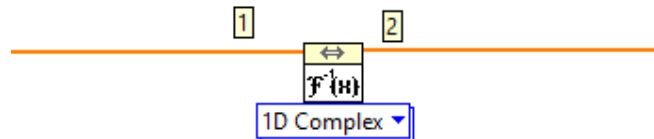


Ilustración 14: Conversión de frecuencia a tiempo.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas en esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - FFT {X}: Secuencia a aplicar la transformada de Fourier inversa.
- Salidas:
 - X: Secuencia resultante después de aplicar la Transformada de Fourier Inversa

5.2.7 Inserción prefijo cíclico y escalado.

Finalmente se inserta un conjunto de muestras para evitar la interferencia entre símbolos OFDMA haciendo uso de las funciones Delete From Array Function y Build Array Function [29]. La función Delete From Array Function retorna un elemento o una subsecuencia de la secuencia de entrada en base a los parámetros indicados de entrada, en esta implementación la función retorna una subsecuencia de los 64 últimos elementos de la secuencia de entrada. A continuación, se utiliza la función Build Array que se encarga de concatenar secuencias. En este caso concatena la secuencia entrada con la subsecuencia generada en la función anterior.

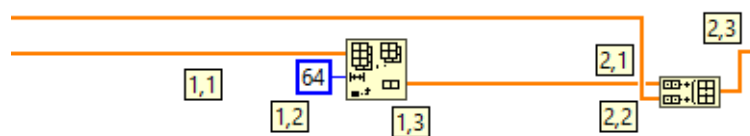


Ilustración 15: Inserción de prefijo cíclico.

Las entradas y salidas de estas funciones son las siguientes:

- Delete From Array Function.
 - Entradas:
 - 1.1-n-dim array: secuencia de entrada a eliminar elemento o subsecuencia de elementos.
 - 1.2-length: Número de elementos a eliminar.
 - Salidas:
 - 1.3-deleted portion: Retorna la subsecuencia eliminada a partir de los parámetros de entrada indicados.
- Build Array Function.
 - Entradas:
 - 2.1-Array: Conjunto de entradas con secuencias a concatenar.
 - Salidas:
 - 2.2- appended array: Retorna una secuencia formada por la concatenación de las secuencias de entrada

Por último, los doce conjuntos prefijo más símbolos OFDMA se concatenan y se transmite hacia el receptor.

5.3 Receptor LTE.

En este apartado se expone como se ha realizado la implementación de un receptor LTE sobre el lenguaje Labview, así como las funciones utilizadas.

5.3.1 Detección del prefijo cíclico.

Para detectar en el receptor la transmisión de información se utiliza el algoritmo de Van de Beek, este algoritmo permite la sincronización sin necesidad de símbolos pilotos apoyándose en la redundancia que tiene el prefijo cíclico.

El algoritmo [30] observa un determinado grupo de $2 * (N + L)$ muestras con el objetivo de detectar un conjunto formado prefijo cíclico y símbolo OFDMA. Seguidamente analizando r que equivale al grupo de muestras pertenecientes al intervalo detectado, α la posición inicial del prefijo cíclico y β la frecuencia se puede encontrar la estimación de máxima verosimilitud de la posición inicial a través de la maximización del logaritmo de la función $f(r/\alpha, \beta)$.

En la implementación de este algoritmo se ha utilizado las funciones ArraySubset [29], esta función permite obtener a partir de una posición y una longitud introducida por parámetro de entrada, una subsecuencia. En este caso se utiliza estas funciones para obtener una subsecuencia de tamaño igual a la secuencia del prefijo cíclico al principio y al final del conjunto prefijo y símbolo OFDMA de cada uno de los 12 conjuntos, a continuación se aplica la ecuación $\delta(m)$ y en paralelo la ecuación $\mu(m)$. Una vez aplicadas las dos ecuaciones se realiza

la estimación de alpha en donde se utiliza la Función Rephase Array [29] la cual genera una matriz de salida en función de las dimensiones indicadas por parámetro de entrada, en este caso se introduce como número de columnas el número de prefijo cíclicos a estimar y como filas el número de iteraciones calculadas para la estimación de la posición inicial del prefijo cíclico. Finalmente se utiliza la función Array Max & Min [29] la cual retorna la posición donde se encuentra el valor máximo o la posición inicial de cada estimación de prefijo cíclico.

- Ecuación delta. $\delta(m) = \sum_{k=m}^{m+L-1} r_k r_{k+N}^*$
- Ecuación mu. $\mu(m) = \frac{1}{2} \sum_{k=m}^{m+L-1} r_k^2 + r_{k+N}^2$
- Estimado de alpha. $\alpha = \max\{\delta(m)^2 - \mu(m)^2\}$

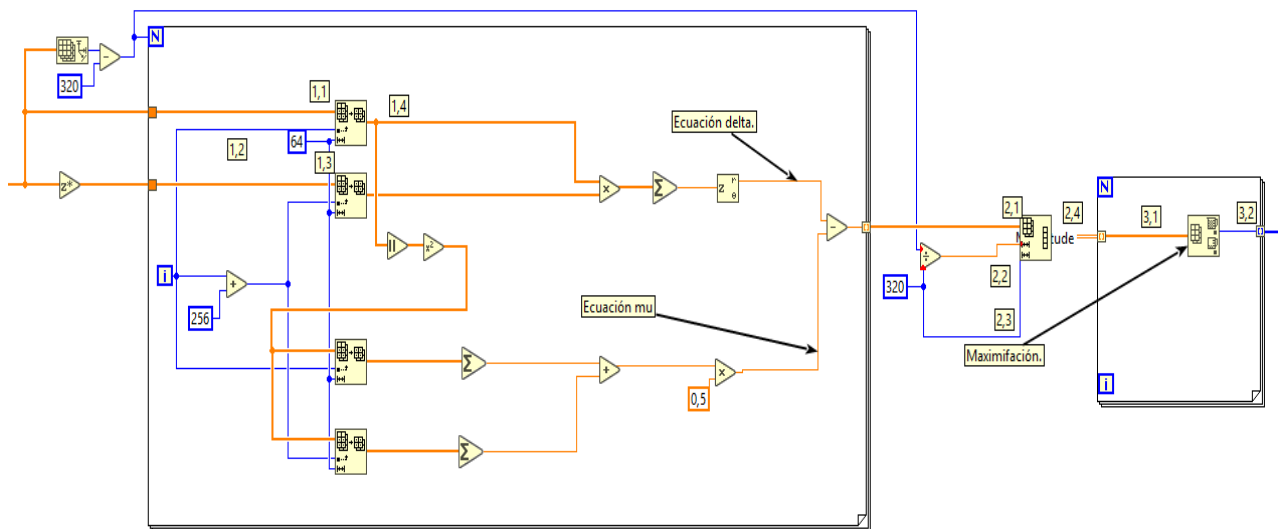


Ilustración 16: Algoritmo de detección Van de Beek.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas de estas funciones son las siguientes:

- Array Subset Function.
 - Entradas:
 - 1.1- array: Secuencia de tiempo de entrada a extraer la subsecuencia requerida.
 - 1.2- index: Valor que indica la posición a partir de la cual extraer la subsecuencia de tiempo
 - 1.3- length: valor que indica el tamaño de la subsecuencia de tiempo.
 - Salidas:

1.4- subarray: Retorna una subsecuencia obtenida a partir de la secuencia de entrada de acuerdo al valor index que indica la posición original de extracción y length que indica el número de elementos a tener la subsecuencia.

- Rephase Array Function.

- Entradas:

- 2.1 n-dim array: Secuencia de símbolos a procesar.

- 2.2- dimension size: dimensiones de la matriz de salida

- Salidas:

- 2.3- m-dim array: Retorna una matriz a partir de los datos de la secuencia de entrada a partir de las dimensiones indicadas por parámetro de entrada.

.

- Array Max & Min Function.

- Entradas:

- 3.1 array: Secuenciade muestras a procesar.

- Salidas:

- 3.2- max index(es): indica la posición donde se encuentra el elemento máximo.

5.3.2 Eliminar el prefijo cíclico.

Una vez detectado el prefijo cíclico de cada uno de los símbolos OFDMA se tiene que eliminar, para ello se utiliza las funciones Array Subset y Split 1D Array [29]. La definición de la función Array Subset es recibir la secuencia de tiempo transmitida y retornar una subsecuencia de tiempo de acuerdo a los parámetros de entrada, en cuanto a la definición de la función Split 1D Array es permitir truncar la secuencia de tiempo transmitida de entrada a partir de la posición introducida por parámetro. En esta implementación se utiliza en primer lugar la función Array Subset, esta función tiene como salida una subsecuencia de tiempo extraída de la secuencia de entrada desde la posición donde se ha detectado un máximo (inicio del prefijo cíclico) por el algoritmo de detección con una longitud de 320 separando el conjunto prefijo más símbolo OFDMA de la secuencia de transmisión formada por el resto de conjuntos prefijo más símbolo OFDMA. A continuación, se utiliza la función Split 1D Array para truncar a partir de la posición 64 la secuencia de tiempo de entrada en dos subsecuencias de tiempo, consiguiendo separar el prefijo cíclico del símbolo OFDMA.

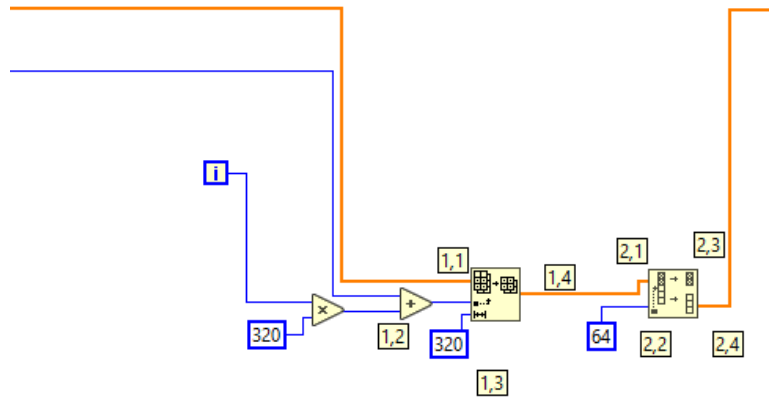


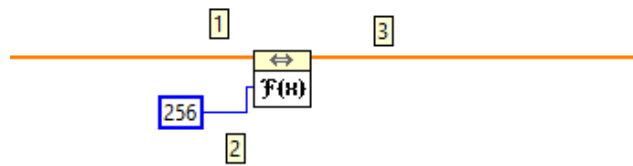
Ilustración 17: Eliminar el prefijo cíclico.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas de estas funciones son las siguientes:

- Array Subset Function.
 - Entradas:
 - 1.1- array: Secuencia de tiempo de entrada a extraer la subsecuencia de tiempo.
 - 1.2- index: Valor que indica la posición a partir de la cual extraer la subsecuencia de tiempo
 - 1.3- length: valor que indica el tamaño de la subsecuencia de tiempo.
 - Salidas:
 - 1.4- subarray: Retorna una subsecuencia obtenida a partir de la secuencia de entrada de acuerdo al valor index que indica la posición original de extracción y length que indica el número de elementos a tener la subsecuencia.
- Split 1D Array Function.
 - Entradas.
 - 2.1 array: Secuencia de entrada a truncar.
 - 2.2 index: Posición a truncar la secuencia de entrada en dos subsecuencias.
 - Salidas.
 - 2.3-first subarray: Subsecuencia de elementos que se encuentran por debajo de la posición index de la secuencia de entrada.
 - 2.4- second subarray: Subsecuencia de elementos que se encuentran por encima de la posición index de la secuencia de entrada.

5.3.3 Conversión de tiempo a frecuencia.

Para realizar la conversión a frecuencia se utiliza la función FFT VI [29] que realiza la Transformada de Fourier que permite la conversión de dominio del tiempo a dominio de la frecuencia mediante dos modos de operación real o complejo. En este caso para esta implementación se utiliza la función FFT VI, esta función capta la secuencia que devuelve el apartado anterior y realiza la conversión de tiempo a frecuencia retronando una secuencia de tamaño 256, suma de la longitud del símbolo OFDMA y las secuencias de símbolos nulos ceros de los extremos para evitar la interferencia.



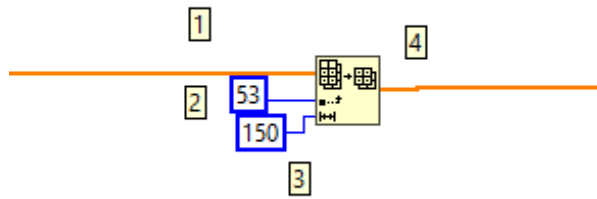
*Ilustración 18: Conversión de dominio de tiempo a dominio de la frecuencia.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

Las entradas y salidas que tiene esta función son las siguientes:

- Entradas.
 - X: Secuencia a aplicar la transformada de Fourier
 - FFT size: Tamaño de la transformada de Fourier.
- Salidas:
 - FFT {X}: Retorna una secuencia después de aplicar la Transformada de Fourier.

5.3.4 Eliminar protección contra interferencias en los umbrales del canal.

Para eliminar la protección contra las interferencias en los extremos del canal de transmisión se utiliza la función Array Subset [29], esta función obtiene como salida una subsecuencia a partir de la secuencia de entrada teniendo en cuenta del número de elementos y la posición inicial indicados por parámetro de entrada. En esta parte de la implementación la función recibe la secuencia retornada por el anterior apartado y devuelve una subsecuencia con los elementos que ocupan de la posición 53 hasta la 150 de la secuencia de entrada eliminando los símbolos nulos insertados en EL transmisor a los extremos del símbolo OFDMA.



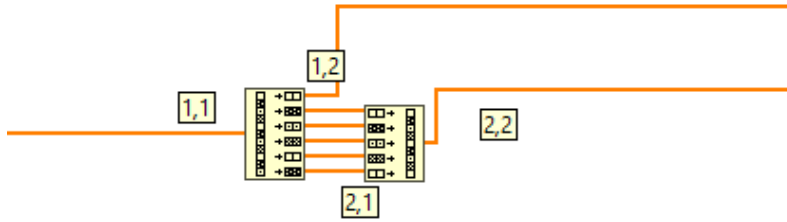
*Ilustración 19: Eliminar reducción de interferencia.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

Las entradas y salidas que tiene esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1-Array: Secuencia de entrada a partir de la cual extraer la subsecuencia.
 - 2-index: Valor que indica la posición a partir de la cual extraer la subsecuencia.
 - 3-length: Valor que indica el tamaño de la subsecuencia.
- Salidas:
 - 4-Subarray: retorna una subsecuencia a partir de la secuencia de entrada y en los parámetros index y length de entrada.

5.3.5 Extracción de símbolos de referencia.

Para extraer los símbolos de referencia insertados por el transmisor en la secuencia de símbolos que forman el símbolo OFDMA se utiliza las funciones Interleave 1D Arrays y Interleave 1D Arrays [29]. La función Interleave 1D Arrays recibe una secuencia y recorre cada una de las salidas de forma constante retornando los elementos de la secuencia de entrada por cada salida, en cuanto a la función Interleave 1D Arrays recorre de manera constante las entradas y obtiene un elemento de cada entrada retornando como salida una secuencia formada por la concatenación de cada uno de los elementos obtenidos. En esta implementación se utiliza la función Interleave 1D Arrays de manera que recibe la secuencia de salida de la Transformada de Fourier y recorre cada una de las seis salidas retornando un elemento de la secuencia por cada una de ellas, de manera que la primera salida retornara todos los símbolos de referencia y el resto de salidas los símbolos que forman el símbolo OFDMA. Más tarde se utiliza la función Interleave 1D Arrays Function, esta función recorre de manera constante las entradas extrayendo el símbolo de entrada y concatenándolos.



*Ilustración 20: Extracción de símbolos de referencia.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

Las entradas y salidas en estas funciones son las siguientes:

- Función Decimate 1D Array Function.
 - Entradas:
 - 1.1-array: Secuencia de símbolos que forman un símbolo OFDMA.
 - Salidas:
 - 1.2- elements: Cada una de las salidas por las que se retornarlas los elementos, seis salidas.
- Interleave 1D Arrays Function.
 - Entradas:
 - 2.1- array: Subsecuencia de símbolos alterados, cinco entradas.
 - Salidas:
 - 2.2- interleaved array: Retorna como salida la concatenación de las subsecuencias de entrada.

5.3.6 Estimación del canal.

A continuación, se realiza una estimación del canal. Este proceso consiste en comparar los símbolos de referencia modificados por el canal con los símbolos de referencia originales para calcular la posible modificación generada por el canal y corregir la secuencia de símbolos que forma cada símbolo OFDMA. Para ello se utiliza la función Index Array, Initialize Array y Build Array [29]. La función Index Array recibe una secuencia de entrada y retorna como salida el elemento que se encuentra en la posición indicada por parámetro de entrada, en cuanto a la función Initialize Array debe crear una secuencia en relación al tamaño y el contenido que se le introduce por parámetro de entrada y por último la función Build Array debe recibir como entrada un conjunto de secuencias retornando como salida la concatenación.

Para la implementación de la estimación del canal en primer lugar dividimos la secuencia de símbolos de referencia original entre la secuencia de símbolos de referencia recibida, obteniendo una secuencia con los factores de modificación por parte del canal en cada uno de los símbolos de referencia, seguidamente se utiliza la función Index Array, esta función retorna cinco elementos pertenecientes a la secuencia de entrada indicados por parámetro, a continuación se utiliza por cada elemento de salida anteriores, la función Initialize Array que retorna una secuencia de cinco posiciones inicializados al elemento de entrada, se elige replicar cinco posiciones el mismo factor de modificación ya que se considera que los símbolos cercanos a cada símbolo de referencia estarán sometidos a un factor de modificación parecido al del símbolo de referencia. Por último, se utiliza la función Build Array que recibe cada una de la secuencia generada por las funciones Initialize Array retornando la concatenación.

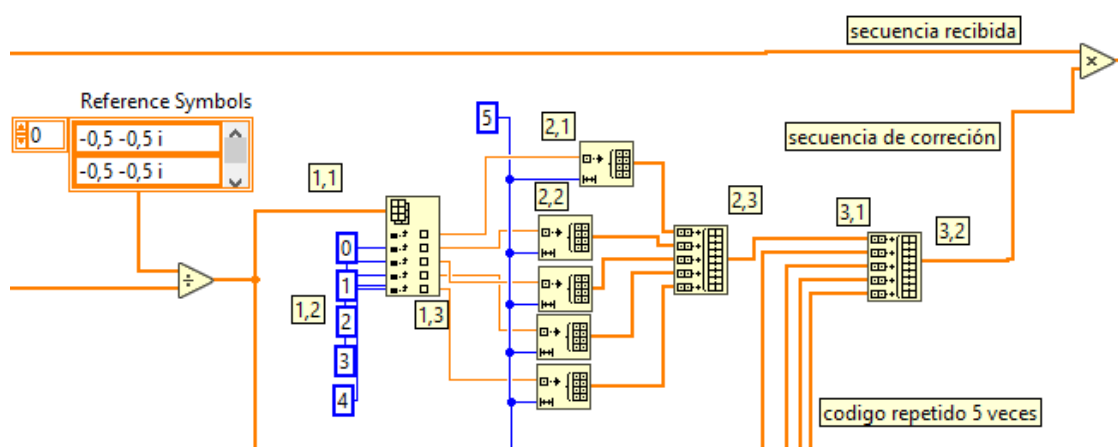


Ilustración 21: Estimación del canal.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas de estas funciones son las siguientes.

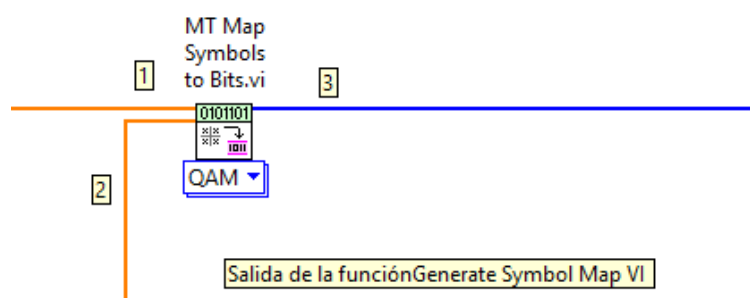
- Index Array Function.
 - Entradas:
 - 1.1- n-dimension array: Secuencia de entrada a obtener elementos.
 - 1.2- index: Valor que indica la posición del elemento a retornar de la secuencia, cinco entradas.
 - Salidas:
 - 1.3- element o subarray: Retorna el elemento de la secuencia de entrada indicado por el valor index, cinco salidas.
- Initialize Array Function.
 - Entradas:
 - 2.1- element: Valor utilizado para inicializar la secuencia.
 - 2.2- dimensión-size: Tamaño de la secuencia a retornar.

- Salidas:
 - 3.2- initialized array: Retorna una secuencia de tamaño dimensión-size e inicializado al valor element.
- Build Array Function.
 - Entradas:
 - 3.1-array or element: Secuencia de entrada a concatenar, cinco entradas.
 - Salidas:
 - 3.2-appended array: Retorna la concatenación de las secuencias de entrada.

Este proceso esta replicado cinco veces con el objetivo de crear una secuencia de 125 elementos que contenga el factor de modificación aproximado, más tarde se multiplica esta secuencia por la secuencia de 125 símbolos que forma el símbolo OFDMA con la finalidad de recuperar aproximadamente el símbolo OFDMA transmitido.

5.3.7 Asociación de símbolos a bits.

Para concluir la implementación del receptor LTE se realiza la conversión de símbolos a bits utilizando la función MT Map Symbols to Bits VI [29], esta función permite obtener los bits asociados a un símbolo de acuerdo al modo de operación deseado. En esta implementación se utiliza la función MT Map Symbols to Bits VI en modo QAM ya que es el modo utilizado en el transmisor. La función recibe una secuencia de símbolos de 125 elementos y obtiene los bits asociados a cada símbolo en base al mapa de símbolos generado por la función MT Generate Symbol Map VI [29] en modo rectangular. Los parámetros a introducir en la función Generate Symbol Map VI en modo rectangular deben ser los mismos que han sido introducidos en el transmisor para la correcta demodulación, en nuestro caso debe ser una modulación 4-QAM que tiene 2 bits por símbolo).



*Ilustración 22: Conversor de símbolos a bits.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

Las entradas y salidas de esta función son las siguientes:

- Entradas.

1-symbols: Secuencia de símbolos a asociar a bits-

2-symbol map: Conjunto de parámetros donde se encuentra el mapa de símbolos para la conversión de símbolos a bits.

- Salidas:

3-Output bit stream: Retorna una secuencia de bits asociados a la secuencia de símbolos de entrada.

5.4 Especificaciones implementadas de la tecnología LTE.

Una vez explicada la implementación en software del sistema transmisor y receptor simple basado en la tecnología LTE, se analiza que especificaciones LTE se han implementado en este proyecto.

En este proyecto se ha desarrollado el enlace descendente o Down link de la tecnología LTE, las especificaciones implementadas son:

Especificación.	Implementación en el proyecto.
Modulación OFDMA	Implementado.
Estructura de la trama(12 soportadoras cada Resource Block)	Implementado.
Señales de referencia.	No implementado.
Timing and Sampling(FFT/IFFT)	Implementado.
Canal de sincronismo	Implementado algoritmo de Van De Beek.
Canales físicos de tráfico(PDSCH y PMCH)	Implementado PDSCH
Canales físicos de Control(PBCH, PDCCH, PCFICH y PHICH)	No implementado.

Tabla 1: Características del estándar LTE implementadas en el proyecto.

Capítulo 6. Implementación del software LTE desarrollado sobre dispositivos USRP.

6.1 Introducción.

Una vez implementado la simulación del transmisor y receptor LTE en el lenguaje de programación gráfico Labview (archivo simulacionLTE.vi) y comprobar el correcto funcionamiento de ambos se realizan pruebas en entorno real. Para ello se utilizan dos dispositivos USRP-2920 donde cada uno implementa el receptor o el transmisor LTE. Este tipo de dispositivos de Radio definida por software permite trabajar en un considerable número de bandas de radiofrecuencia es por ello por lo que estos dispositivos son versátiles permitiendo implementar un gran número de tecnologías de comunicaciones como por ejemplo GSM, UMTS, GPRS o en este caso LTE. En este capítulo se explican las modificaciones realizadas en el archivo SimulaciónLTE.vi implementado en software con el objetivo de adaptar el código a los dispositivos USRP 2920 para analizar su funcionamiento, para ello se separa la concatenación del sistema de transmisión y recepción realizada en el archivo SimulacionLTE.vi creando dos archivos independientes donde cada uno contenga el transmisor y el receptor desarrollado., Estos archivos tienen el nombre de transmisorLTE.vi y receptorLTE.vi. Sobre estos archivos se utiliza el paquete de comunicaciones USRP este paquete proporciona un conjunto de funciones para la configuración del hardware y software a través de herramientas de apertura de sesión, cierre de sesión, lectura y escritura de datos.

6.2 Adaptación del transmisor LTE al dispositivo USRP.

En este apartado se explican las modificaciones realizadas al transmisor LTE realizado en la Simulación LTE para poderlo implementar en los dispositivos USRP. Analizando la implementación del Simulador LTE podemos afirmar que las partes de desarrollo como la generación mapa de símbolos por la cual se crea la constelación de símbolos, la asociación de bits a símbolos en donde se agrupan un conjunto de bits de información a un símbolo en función de la modulación elegida, la generación símbolos OFDMA en este caso 12 símbolos OFDMA de 125 símbolos para cumplir con los estándares, la inserción de símbolos de referencia para realizar la estimación del canal y detectar la posible modificación, la reducción de interferencia en los límites del canal insertando símbolos nulos en los extremos del símbolo OFDMA, la conversión de

frecuencia a tiempo y la inserción prefijo cíclico y escalado para reducir la interferencia entre símbolos OFDMA. Son desarrollados de la misma forma que en el proyecto Simulación LTE explicado en el capítulo 4. Sin embargo, se utilizan ciertas funciones con el objetivo de adaptar el transmisor LTE al dispositivo USRP 2920, por ello se distinguen diferentes partes en el proceso de adaptación.

6.2.1 Abrir una sesión USRP.

Para poder utilizar el software implementado sobre los dispositivos USRP es necesario establecer una sesión sobre la que se opere la transmisión, destaca la función niUSRP Open Tx Session VI [28]. Esta función genera una sesión de transmisión a los dispositivos introducidos por el parámetro de entrada device names y retorna un identificador. En esta implementación se introduce la dirección IP que tiene la interfaz de entrada del dispositivo conectado por Ethernet al ordenador y genera un identificador de la sesión utilizado para la transmisión.

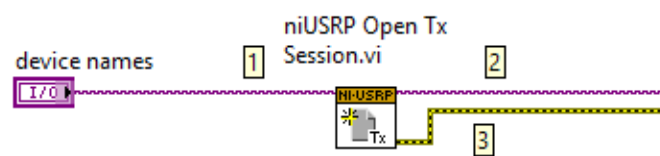


Ilustración 23: Abrir una sesión USRP en el transmisor.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas que tiene esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1-device names: Dirección Ip del dispositivo.
- Salidas:
 - 2-session handle out: Retorna un identificador para la transmisión.
 - 3-error out: Transmite información de los posibles errores generados.

6.2.2 Configuración de sesión del dispositivo USRP.

Una vez generada la sesión es necesario la configuración de los parámetros de transmisión, destaca la función niUSRP Configure Signal VI [28]. Esta función permite la configuración de todos los elementos relacionados con el proceso de transmisión de información, alguno de estos parámetros son la tasa de IQ, frecuencia de portadora o

ganancia. Para la implementación del transmisor LTE en los dispositivos USRP la función recibe el identificador de sesión generado y parámetros de entrada como la IQ rate cuyo valor es 5MHZ, carrier frequency cuyo valor es 600MHz, gain cuyo valor es de 8 y active antenna cuyo valor es TX indicando así que el dispositivo es un transmisor. Esta función retornará el identificador de sesión a la siguiente función.

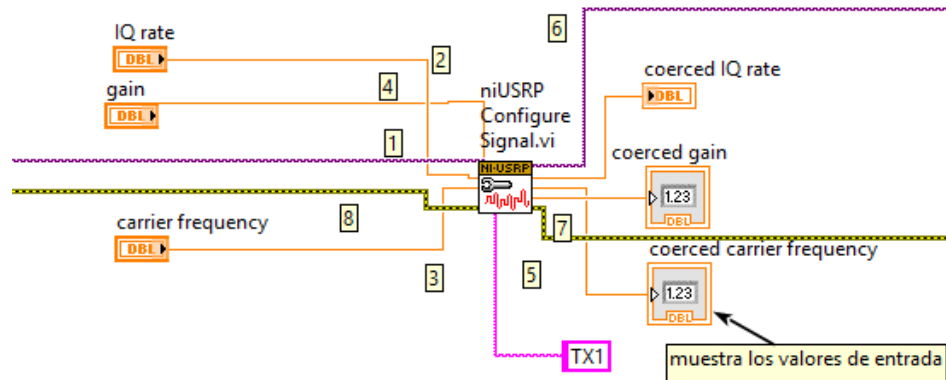


Ilustración 24: Configuración de la sesión del dispositivo USRP transmisor.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas de esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1-session handle: Identificador de sesión para inicializar la transmisión asociada.
 - 2-IQ rate: Tasa de escritura del transmisor LTE.
 - 3-carrier frequency: Frecuencia de la señal portadora.
 - 4-gain: Potencia asignada a la señal, en decibelios.
 - 5-active antenna: Indica el modo de operación del USRP.
 - 8-error in: Errores producidos antes de la ejecución de esta función.
- Salidas:
 - 6-session handle: Retorna un identificador para la transmisión.
 - 7-error out: Transmite información sobre los posibles errores.

6.2.3 Escribir los datos en el canal.

Una vez configurado los parámetros de la transmisión se escriben los datos en el canal, haciendo uso de la función niUSRP Write Tx Data (poly) VI [28]. Esta función se encarga de transmitir los datos al canal en relación al modo de operación indicado. En

el transmisor LTE implementado se utiliza esta función en modo CBD donde escribe la secuencia de datos complejos recibida en el canal a partir del identificador de sesión. La función retorna el identificador de sesión para ser utilizada por otra función.

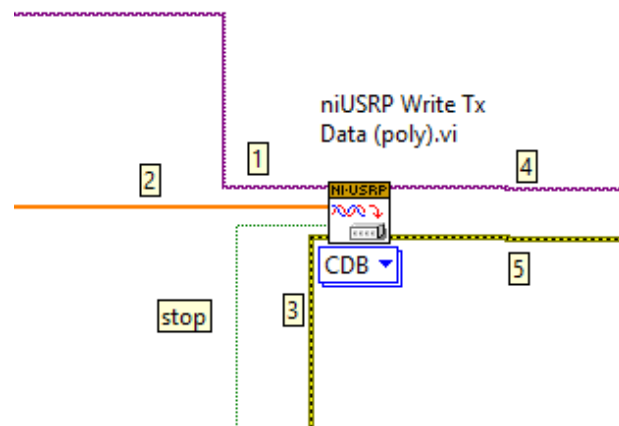


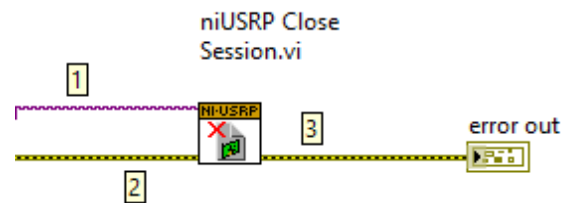
Ilustración 25: Escritura de datos en el canal por el transmisor.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas de esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1-session handle: Identificador de la sesión donde se está operando.
 - 2-data: Secuencia de tiempo a escribir en el canal.
 - 3-error in: Errores producidos antes de la ejecución de la función.
- Salidas:
 - 4-session handle out: Retorna un identificador para la transmisión.
 - 5-error out: Transmite información sobre los posibles errores.

6.2.4 Clausurar una sesión USRP.

Por último, se realiza el cierre de sesión USRP con el fin de liberar el dispositivo utilizando la función niUSRP Close Session VI [28], esta función cierra la sesión del dispositivo. En la implementación realizada la función recibe el identificador de sesión y clausura la sesión seguidamente retorna los posibles errores generados en la transmisión para mostrarlos en la interfaz.



*Ilustración 26: Clausurar una sesión USRP en el transmisor.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

Las entradas y salidas de esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1-session handle: Identificador de sesión a clausurar.
 - 2-error in: Errores producidos antes de la ejecución de esta función.
- Salidas:
 - 3-error out: Transmite información sobre los posibles errores.

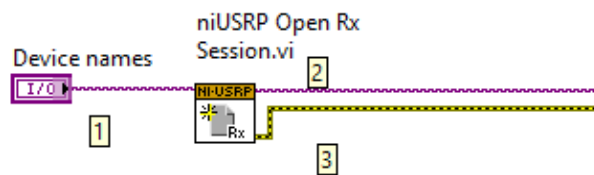
6.3 Adaptación del receptor LTE al dispositivo USRP.

En este apartado se explican las posibles modificaciones generadas al receptor LTE desarrollado en el proyecto Simulación LTE con el fin de adaptarlo a los dispositivos USRP. Analizando el desarrollo del receptor LTE implementado en el proyecto Simulación LTE se puede comprobar que al igual que ocurre en el transmisor LTE hay un conjunto de partes de desarrollo como la detección del prefijo cíclico para localizar el inicio de la secuencia de transmisión, la eliminación del prefijo cíclico, la conversión de tiempo a frecuencia, la eliminación del sistema de reducción de interferencias en los límites del canal de transmisión extrayendo la secuencia de símbolos nulos de los extremos del símbolo OFDMA, la extracción de símbolos de referencia para la posterior estimación del canal, la estimación del canal para corregir las posibles alteraciones por parte del canal a la secuencia de información y la asociación de símbolos a bits son implementados de la misma forma que en el proyecto Simulación LTE explicado en el capítulo cuatro.

Sin embargo, se pueden destacar diferentes funciones para poder adaptar el receptor LTE a los dispositivos USRP 2920, por ello se distinguen diferentes partes en el proceso de adaptación.

6.3.1 Abrir una sesión USRP.

En primer lugar, al igual que en el transmisor LTE para poder implementar el receptor LTE sobre dispositivos USRP es necesario generar una sesión de recepción, destaca la función niUSRP Open Rx Session VI [28]. Esta función genera un identificador de sesión de recepción para los dispositivos introducidos por parámetro. En esta implementación del receptor LTE esta función recibe la dirección IP de la interfaz de entrada del dispositivo conectado por Ethernet al ordenador y genera un identificador de sesión.



*Ilustración 27: Abrir una sesión USRP en el receptor.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

Las entradas y salidas de esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1-device names: Dirección Ip del dispositivo.
- Salidas:
 - 2-session handle out: Retorna un identificador para la transmisión.
 - 3-error out: Transmite información de los posibles errores generados.

6.3.2 Configuración de sesión del dispositivo USRP.

Seguidamente, se configura los parámetros de recepción del receptor LTE, destaca la función niUSRP Configure Signal VI [28]. Esta función permite configurar todos los parámetros relacionados con la recepción de datos. Para la implementación de esta parte en el proyecto se configuran los parámetros coincidiendo con los parámetros configurados en el transmisor LTE. Posteriormente esta función retorna la identificación de sesión para que sea utilizado por otra función.

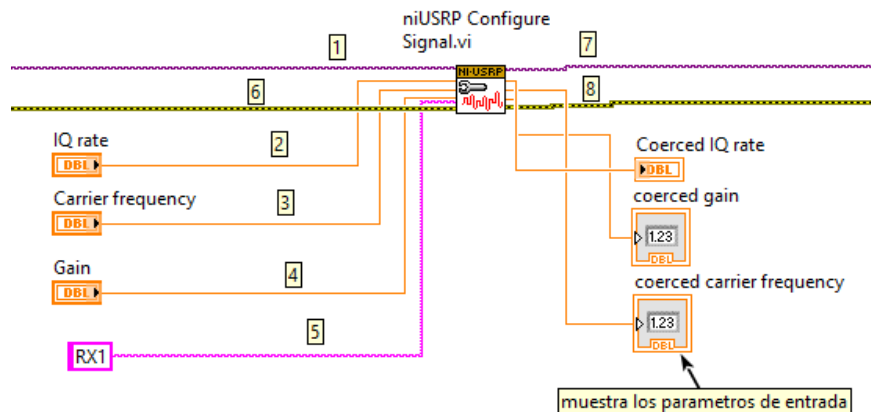


Ilustración 28: Configuración de sesión del dispositivo USRP receptor.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y las salidas de esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1-session handle: Identificador de la sesión donde se está operando.
 - 2-IQ rate: Tasa de escritura del transmisor LTE.
 - 3-carrier frequency: Frecuencia de la señal portadora.
 - 4-Gain: Potencia asignada a la señal, en decibelios.
 - 5-active antenna: Indica el modo de operación del USRP.
 - 6-error in: Errores producidos antes de la ejecución de esta función.
- Salidas:
 - 7-session handle: Retorna un identificador para la transmisión.
 - 8-error out: Transmite información sobre los posibles errores.

6.3.3 Iniciar la recepción de datos.

Para inicializar la recepción de los datos se utiliza función niUSRP Initiate VI [28]. Esta función inicia la recepción de datos. La implementación en este proyecto hace uso de esta función la cual recibe el identificador de sesión e inicia la recepción para finalmente retornar el identificador de sesión.

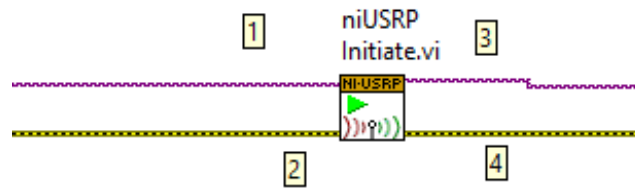


Ilustración 29: Inicializar la recepción de datos.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas de esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1-session handle: Identificador de sesión para inicializar la transmisión asociada.
 - 2-error in: Errores producidos antes de la ejecución de esta función.
- Salidas:
 - 3-session handle out: Retorna un identificador para la transmisión.
 - 4-error out: Transmite información sobre los posibles errores.

6.3.4 Leer datos del canal.

Una vez iniciada la recepción se leen los datos del canal, haciendo uso de la función niUSRP Fetch Rx Data (poly) VI [28]. Esta función extrae los datos que se transmiten por el canal de acuerdo al modo de operación seleccionado. Para la implementación de la lectura del canal en el receptor LTE se usa esta función en modo CDB la cual obtiene los datos complejos del canal en función del identificador de sesión y el número de muestras introducidas por parámetro. El número de muestras a obtener del canal en este proyecto es 1250.

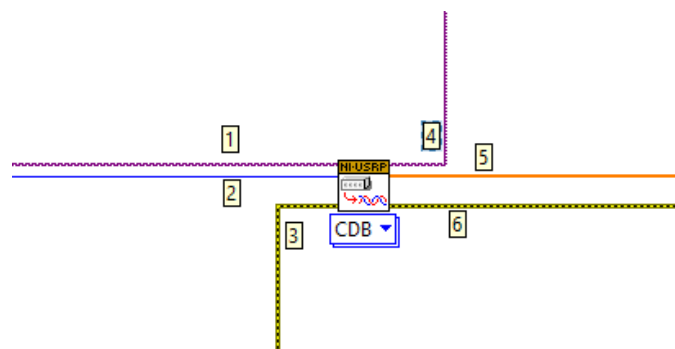


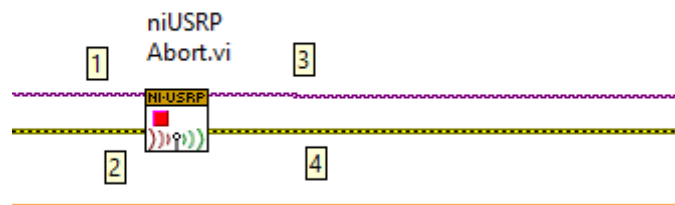
Ilustración 30: Lectura de datos en el canal de recepción.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Las entradas y salidas de esta función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1-session handle: Identificador de la sesión donde se está operando.
 - 2-data: Secuencia de tiempo a escribir en el canal.
 - 3-number of samples: Número de muestras a obtener del canal.
 - 4-error in: Errores producidos antes de la ejecución de la función.
- Salidas:
 - 5-session handle out: Retorna un identificador para la transmisión.
 - 6-error out: Transmite información sobre los posibles errores.

6.3.5 Detener la recepción.

Una vez que se considere el fin de la recepción de información se procede a detener el receptor haciendo uso de la función niUSRP Abort VI [29]. Esta función detiene la recepción de datos previamente iniciada. En la implementación de este apartado en el receptor LTE se utiliza esta función la cual detiene la recepción asociada al identificador de sesión y retorna el identificador para que lo utilicen otras funciones.



*Ilustración 31: Detener una sesión USRP en el receptor.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

Las entradas y salidas de esta función son las siguientes:

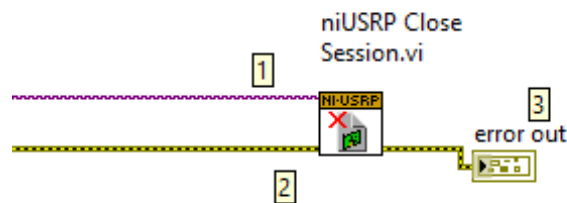
Entradas:

- 1-device names: Dirección Ip del dispositivo.
- 2-error in: Errores producidos antes de la ejecución de la función.

- Salidas:
 - 3-session handle out: Retorna un identificador para la transmisión.
 - 4-error out: Transmite información de los posibles errores generados.

6.3.6 Clausurar una sesión USRP.

Finalmente, después de detener la recepción de información se clausura la sesión utilizando la función niUSRP Close Session VI [28]. Esta función clausura la sesión vinculada al dispositivo. Para la implementación de este proyecto se utiliza esta función la cual recibe el identificador de sesión y lo clausura posteriormente retorna como salida los posibles errores de recepción como se explicó en la adaptación del transmisor LTE al dispositivo USRP2920.



*Ilustración 32: Clausurar una sesión USRP en el receptor.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

Las entradas y las salidas de la función son las siguientes:

- Entradas:
 - 1-session handle: Identificador de sesión a cerrar.
 - 2-error in: Errores producidos antes de la ejecución de esta función.
- Salidas:
 - 3-error out: Transmite información sobre los posibles errores.

Capítulo 7. Pruebas.

7.1 Introducción.

A lo largo de este capítulo se explican las diferentes pruebas que se van a ejecutar para analizar el correcto funcionamiento de la tecnología LTE implementada en el lenguaje de programación Labview sobre dispositivos USRP. El principal objetivo de estas pruebas es comprobar y analizar una serie de puntos.

- Correcto funcionamiento del transmisor LTE.
- Correcto funcionamiento del receptor LTE.
- Analizar si cumple las especificaciones definidas por el estándar LTE desarrollado por el 3Gpp.

Estas validaciones se van a realizar para dos tipos de pruebas. En primer lugar, se va a comprobar la respuesta del sistema de comunicación desarrollado cuando se transmite un valor numérico constante y más tarde se va a comprobar la respuesta del sistema mediante la transmisión de texto.

7.2 Transmisión de valores numéricos.

En esta primera prueba se va a analizar el correcto funcionamiento del transmisor y receptor LTE transmitiendo un determinado conjunto de valores numéricos. Este proyecto está implementado para que se pueda transmitir datos de 8 bits por 375 usuarios sin embargo en esta prueba por simplicidad se trabaja con 7 usuarios modificando los datos que transmiten, los datos del resto de usuarios se generan aleatoriamente gracias a la función MT generar bits (poli) VI [29]. Dicha función permite generar una secuencia de bits de datos en función del modo indicado, puede ser Fibonacci u orden PN entre otros.

7.2.1 Implementación en el transmisor LTE.

En el código perteneciente al transmisor LTE se ha insertado 7 controladores numéricos que representan el valor expresados en 8 bits de cada usuario del cual se quiere modificar su dato de transmisión. Seguidamente, después de cada controlador numérico, se utilizan las funciones Build Array [29] para concatenar cada uno de los 7 valores representados en 8 bits para, finalmente, concatenar esta secuencia con la secuencia de bits generada por la función MT generate bits [29] la cual representará los datos del resto de los usuarios. La función MT generate bits hace uso del algoritmo PN

Order que representa los datos del resto de usuarios. El resultado de todo este proceso es una secuencia de tamaño 375 datos por 8 bits cada dato.

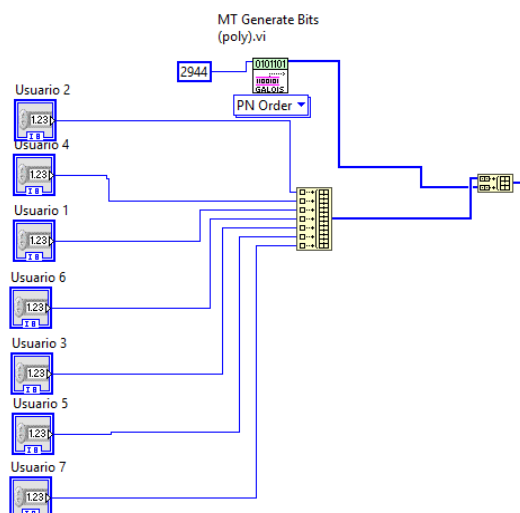


Ilustración 33: Prueba transmisión de valores numéricos.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

7.2.1 Implementación en el receptor LTE.

En el código perteneciente al receptor LTE, se obtiene el valor de los siete controladores que se han elegido en el transmisor. Para ello el receptor, una vez recibida una secuencia de símbolos, retorna una secuencia de bits de tres mil posiciones (375 datos por 8 bits). A continuación, y para obtener los datos elegidos en el transmisor; se utiliza en paralelo siete veces la función Array Subset [29] que permite obtener a través del tamaño y la posición inicial del dato en la secuencia de entrada y, una subsecuencia que contiene los bits pertenecientes al dato que se quiere extraer. Seguidamente, después de cada función Array Subset, se utiliza la función Not Equal To 0?[29] que retorna la secuencia modificando las posiciones que contienen el valor uno por el valor true y las posiciones que contienen el valor cero por el valor false. Finalmente, después de las funciones Not Equal To 0?, Se utilizan las funciones Boolean Array To Number [29] que permite convertir una secuencia booleana en un valor entero representado a través de 8 bits que se muestra a través del indicador.

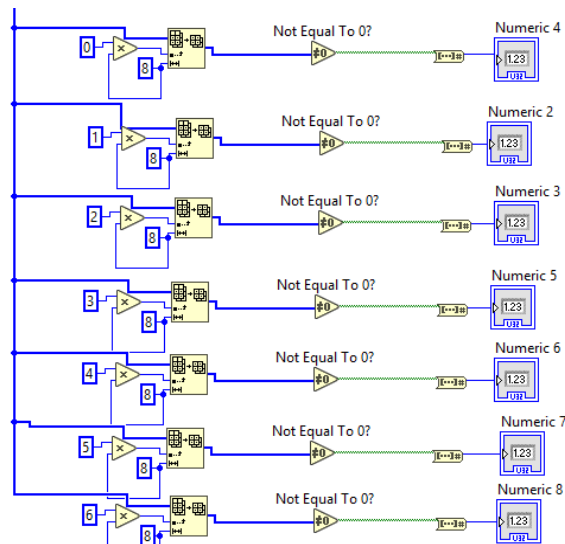


Ilustración 34: Prueba recepción de valores numéricos.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

7.3 Transmisión de texto.

En esta segunda prueba se va a analizar el correcto funcionamiento del transmisor y receptor implementado mediante el envío de texto en formato ASCII. Para la simplificación en la ejecución de esta prueba se va a trabajar con 3 de los 375 usuarios que soporta la implementación, siendo los datos de los usuarios restantes generados también por la función MT generate bits (poli) VI [29].

7.3.1 Implementación en el transmisor LTE.

Una vez se introduce el texto a transmitir [29], en los tres controladores de cadenas se añade un offset al texto y, seguidamente, se utilizan las funciones String To Byte Array [29] para convertir la cadena de texto en una secuencia de bytes., Después de las funciones String To Byte Array se recorren las secuencias de bytes extrayendo los elementos para aplicar las funciones Number To Boolean Array [29] que convierte cada byte en una secuencia de dos dimensiones booleana. Posteriormente se realiza la conversión a una secuencia booleana de una dimensión haciendo uso de las funciones Reshape Array [29] a partir del cálculo del número de elementos que tiene la secuencia de dos dimensiones a través de las funciones Array Size [29] que retornan las dimensiones de la secuencia de dos dimensiones y de las funciones Multiply Array Elements [29] las cuales se encargan de multiplicar ambas dimensiones para obtener el número de elementos que debe tener la secuencia de salida de una dimensión. Luego se utilizan las funciones Array Subset [29] con el objetivo de transmitir subsecuencias de ocho posiciones de la secuencia de entrada de una dimensión. A continuación, se concatenan las tres subsecuencias booleanas de ocho posiciones con la función Build Array [29] y se convierte la secuencia booleana de salida en una secuencia de bits con las funciones Boolean To (0,1) y To Byte Integer [29]. Por último, se concatena esta

secuencia de bits con la secuencia de bits generada por la función MT generar bits [29] que simula los datos del resto de usuarios y se transmite hacia la función MT Map Bits to symbols.

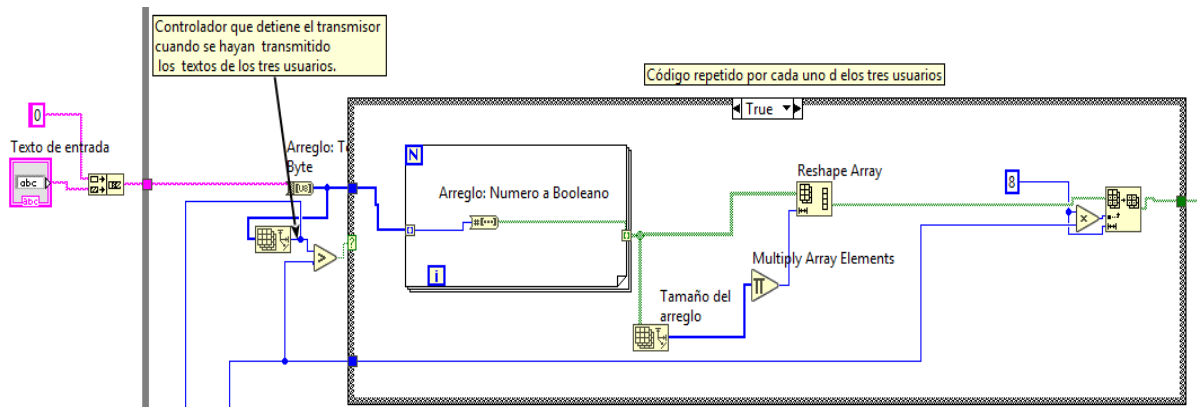
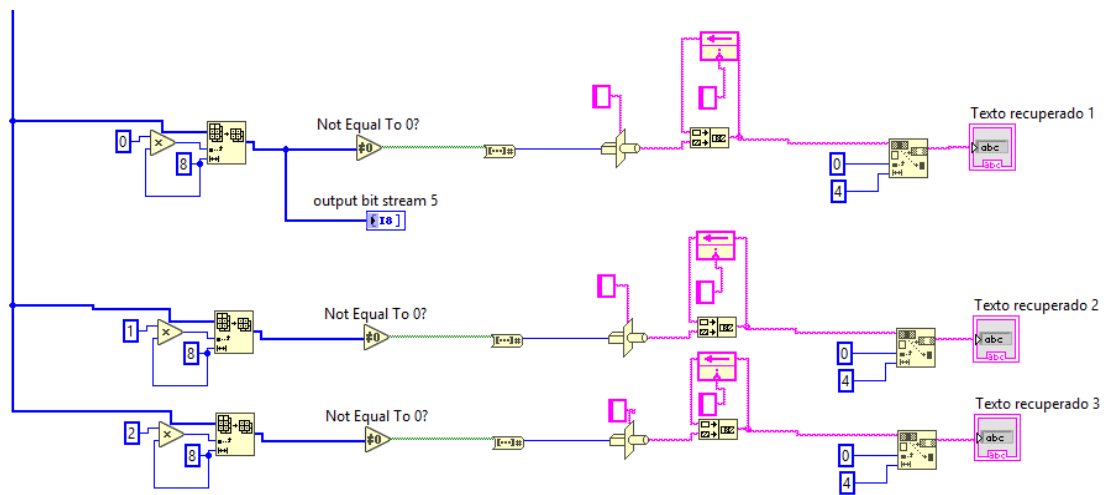


Ilustración 35: Prueba transmisor de texto.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

7.3.2 Implementación en el receptor LTE.

El receptor LTE obtiene el texto que se ha elegido en el transmisor. Para ello, el receptor, una vez demodulada la secuencia de símbolos, retorna una secuencia de tres mil bits. A continuación, empieza el proceso de extracción de los valores que forman parte de los 3 textos para ello se utiliza en paralelo 3 veces la función Array Subset [29] que permite obtener a través del tamaño y la posición inicial del dato en la secuencia, una subsecuencia que contiene los bits pertenecientes al dato que se quiere extraer, más tarde de cada función Array Subset se utiliza la función Not Equal To 0? [29] que retorna la secuencia modificando las posiciones que contienen el valor uno por el valor true y las posiciones que contienen el valor cero por el valor false luego se obtienen los valores que forman parte de los textos utilizando las funciones Boolean Array To Number [29] que permite convertir una secuencia booleana en un valor representado en ocho bits, seguidamente se hace una conversión de entero a string en cada una de las salidas de las funciones Boolean Array To Number [29], y se concatenan todos los elementos que se reciben mediante las funciones Concatenate Strings [29], estas funciones tienen como entradas el valor recibido actual y la concatenación de los datos recibidos posteriores. Por último, se elimina el offset introducido en el transmisor y se muestra por los indicadores cada uno de los textos.



*Ilustración 36: Prueba receptor de texto.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

Capítulo 8. Análisis de los resultados.

8.1 Introducción.

En este capítulo se va a analizar los resultados que se han obtenido en cada una de las pruebas descritas en el capítulo anterior. Para comprobar si la implementación de la tecnología LTE realizada en este proyecto funciona correctamente, se repetirá cien veces las pruebas en cada uno de los entornos propuestos, partiendo del entorno más sencillo (SimuladorLTE.vi) aquel que esta implementado en el lenguaje de programación Labview independiente del dispositivo hardware, hasta el entorno más complejo (transmisorLTE.vi y receptorLTE.vi) cuya implementación es adaptada a los dispositivos USRP.

Para analizar las diferentes pruebas en cada uno de los entornos se va a comprobar diferentes indicadores.

- Primer entorno (SimuladorLTE.vi): Implementación de la tecnología LTE sobre lenguaje de programación Labview.
 - Análisis de la Tasa de error de bit (BER).
 - Comprobar si el valor transmitido es igual al valor recibido.
- Segundo entorno (transmisorLTE.vi y receptorLTE.vi): Implementación de la tecnología LTE en el lenguaje de programación Labview adaptado al dispositivo USRP.
 - Comprobar si el valor a transmitir es igual al valor recibido.
 - Comprobar la transmisión del transmisor LTE.



*Ilustración 37: Entorno de desarrollo de pruebas.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

8.2 Análisis de resultados del primer entorno.

En este primer entorno se trabaja con el desarrollo de la tecnología LTE implementado sobre en lenguaje de programación Labview independiente del dispositivo hardware., El archivo llamado SimulaciónLTE.vi está formado por el código del transmisor LTE conectado al código del receptor LTE desarrollados.

8.2.1 Transmisión de números constantes.

Para realizar esta prueba se introduce un número en los 7 controladores numéricos presentes en la interfaz del archivo SimuladorLTE.vi y, a continuación, se asignan los valores para utilizar una configuración 4-QAM introduciendo la malla de símbolos, para indicar la posición de los símbolos en la constelación. Seguidamente, se configura la ganancia a un valor de uno, para no introducir escalado y las modificaciones de amplitud en la componente de cuadratura y fase.

Finalmente, se ejecuta el proyecto a fin de obtener la respuesta del sistema. Repitiendo esta prueba durante cien veces se comprueba que los resultados son muy satisfactorios, debido a que la tasa de error de bit la cual muestra la probabilidad de error de la secuencia recibida, en comparación con la secuencia original y dividida entre el número de elementos, es cero. También, comparando el valor a transmitir con el valor recibido se puede observar que es igual en todas las repeticiones de la prueba.

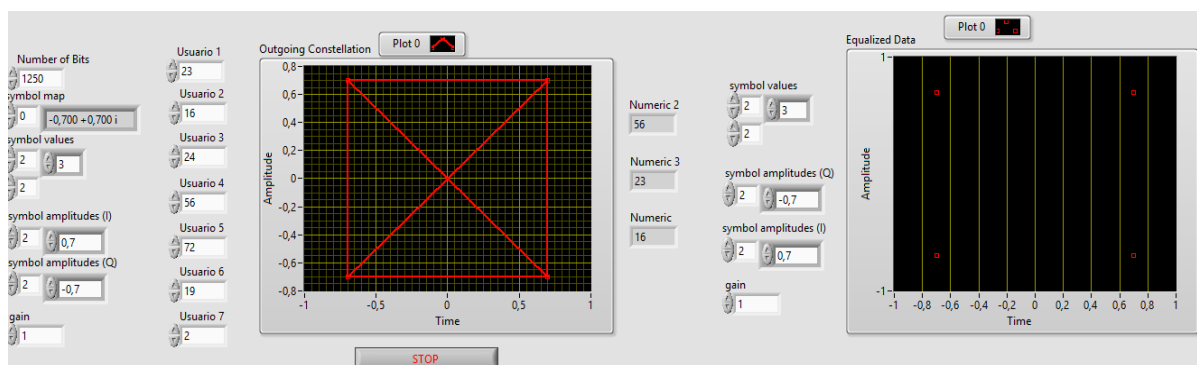


Ilustración 38: Simulación prueba 1 transmisión de números constantes.

Fuente: Desarrollo del proyecto.

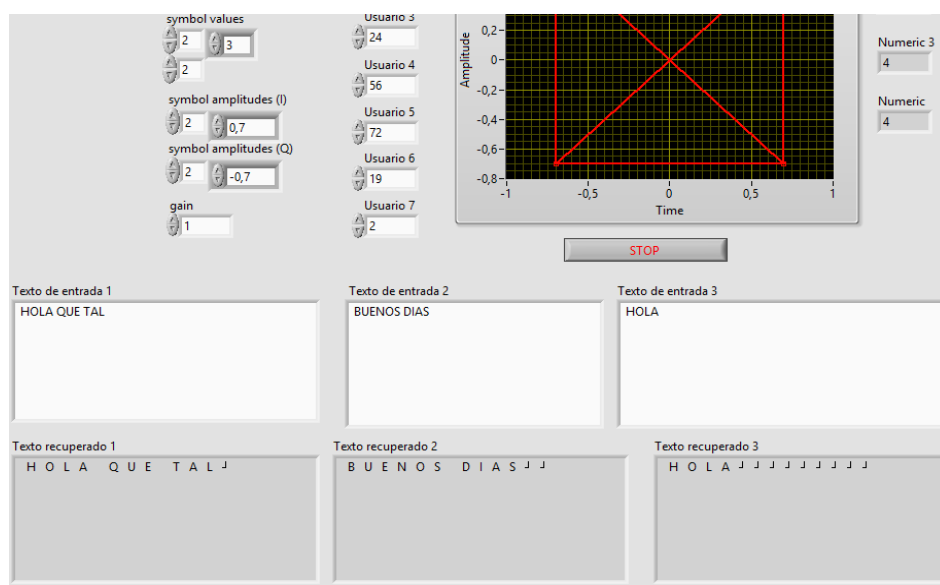
Se puede comprobar el correcto funcionamiento del sistema transmisor y receptor al observar los datos modulados y de modulados de los usuarios cuatro, uno y dos elegidos al azar.

8.2.2 Transmisión de texto.

Para realizar esta prueba se introduce un texto en cada uno de los tres controladores string presentes en la interfaz del archivo SimuladorLTE.vi., A

continuación, se procede a configurar los valores para utilizar una configuración 4-QAM, introduciendo la malla de símbolos para indicar la posición de los símbolos en la constelación. Al igual que en el apartado 7.2.1, la ganancia se configura a un valor 1. Una vez configurado el entorno, se ejecuta el proyecto para comprobar la respuesta de salida.

Analizando cada una de las cien veces que se repite esta prueba se puede observar que el texto transmitido coincide con el texto de salida. También la tasa de error de bit calculada mediante la comparación entra la secuencia original y la secuencia recibida dividida entre el número de elementos de la secuencia es cero en cada una de las repeticiones.



*Ilustración 39: Simulación prueba 2 transmisiones de texto.
Fuente: Desarrollo del proyecto.*

Se puede comprobar el correcto funcionamiento del sistema transmisor y receptor al observar los textos modulados y de modulados de los usuarios uno dos y tres elegidos al azar.

8.2.3 Conclusiones.

Analizando los resultados obtenidos en cada una de las dos pruebas se puede afirmar que los resultados son muy satisfactorios y que están correlados con los resultados esperados. Esto es debido a que al conectar en software el código del transmisor y receptor LTE tal y como se ha desarrollado en el archivo SimuladorLTE.vi no hay presencia de ningún canal que altere la secuencia que se está transmitiendo, por ello la Tasa de Error de bit debe ser cero y se debe recuperar sin problemas el texto.

8.3 Análisis de resultados del segundo entorno.

En este segundo entorno se va adaptar el software de los sistemas de transmisión y recepción concatenados en el archivo SimuladorLTE.vi sobre los dispositivos USRP, con el fin de realizar pruebas en entorno real. Para la preparación de este segundo entorno se separa el software transmisor y receptor del archivo SimuladorLTE.vi y se modifica haciendo uso de la librería USRP, para adaptarlo a los equipos., Como resultado se tendrá dos archivos transmisorLTE.vi y receptorLTE.vi donde cada equipo USRP ejecutará uno de ellos proporcionándole la funcionalidad de sistema transmisor o receptor.

8.3.1 Transmisión de números constantes.

Para ejecutar esta prueba al igual que se ha explicado en el análisis de resultados del primer entorno se introduce un número en cada uno de los siete controladores numéricos y se configura los parámetros necesarios para la transmisión del dispositivo USRP. En este caso, la frecuencia de la portadora 600MHz, Tasa de escritura 5MHz y ganancia de la antena 9 decibelios. Por otro lado, se introducen los valores para utilizar una modulación 4-QAM indicando la malla de símbolos para establecer la posición de los símbolos en la constelación. Al igual que en pruebas anteriores, la ganancia se configura a uno, para no introducir escalado ni alterar la componente de cuadratura y/o fase.

Repitiendo la prueba durante cien veces se puede comprobar que la tasa de error de bit ya no es cero, sino que varía entre 0 y 0.3. También se observa que un cuarto de las cien repeticiones de la prueba, el valor transmitido no es igual al valor recibido.

Interfaz transmisor LTE.

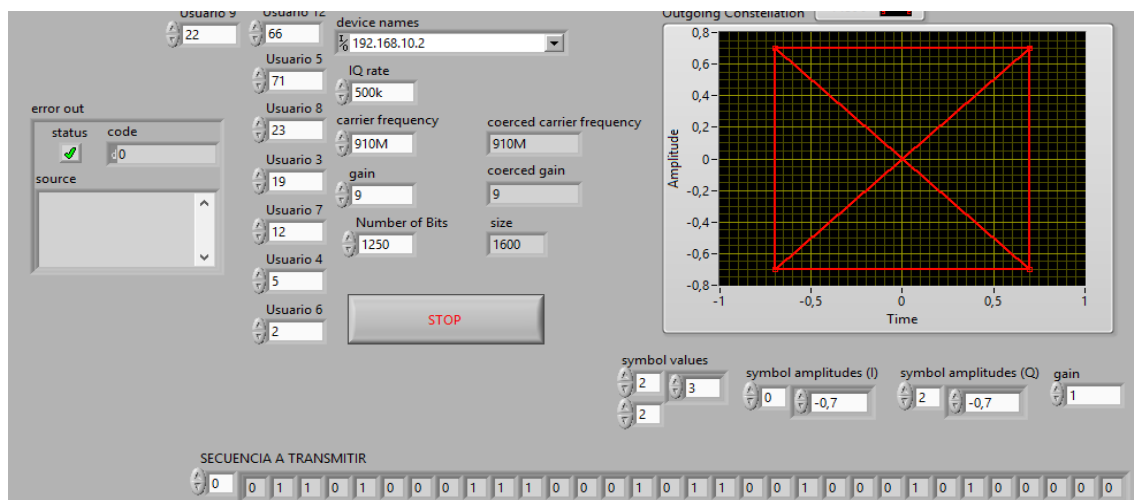


Ilustración 40: Implementación en entorno real de la prueba 1 transmisión de números constantes sobre transmisor LTE.

Fuente: Desarrollo del proyecto.

Interfaz receptor LTE.

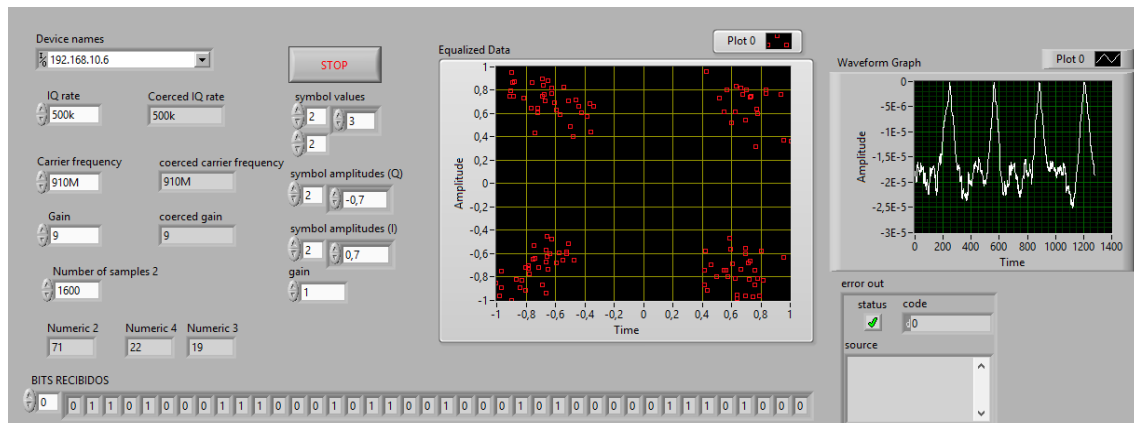


Ilustración 41: Implementación en entorno real de prueba 1 transmisión de números constantes sobre receptor LTE.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Se puede comprobar el correcto funcionamiento del sistema transmisor y receptor al observar los textos modulados y de modulados de los usuarios cinco, nueve y tres elegidos al azar.

8.3.2 Transmisión de texto.

Para realizar esta prueba se introduce un texto en cada uno de los tres controladores string tal y como se realiza en el primer entorno. A continuación, se configura los parámetros de transmisión pertenecientes al dispositivo USRP y los parámetros necesarios para establecer una modulación 4-QAM tal y como se realiza en la prueba de transmisión de números.

Una vez repetida la prueba durante cien veces se puede observar que la tasa de error de bit varía aproximadamente entre los mismos valores que lo hacia la prueba de transmisión de números, entre 0 y 0.35. También se observa que aproximadamente un poco más de un cuarto de las cien repeticiones de la prueba, no cumple que el texto transmitido sea igual al texto recibido.

Interfaz transmisor LTE.

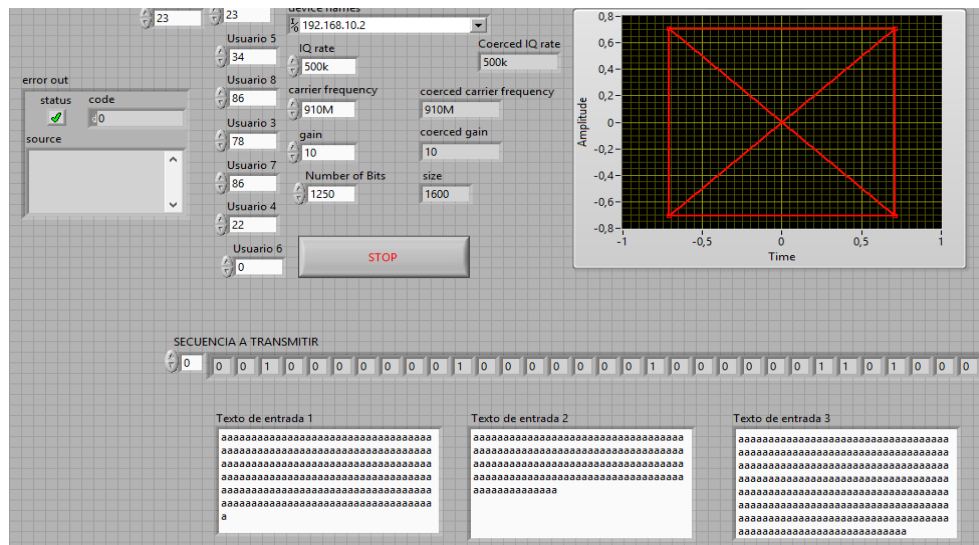


Ilustración 42: Implementación de la prueba 2 transmisiones de texto sobre transmisor LTE-USRP.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Interfaz receptor LTE.

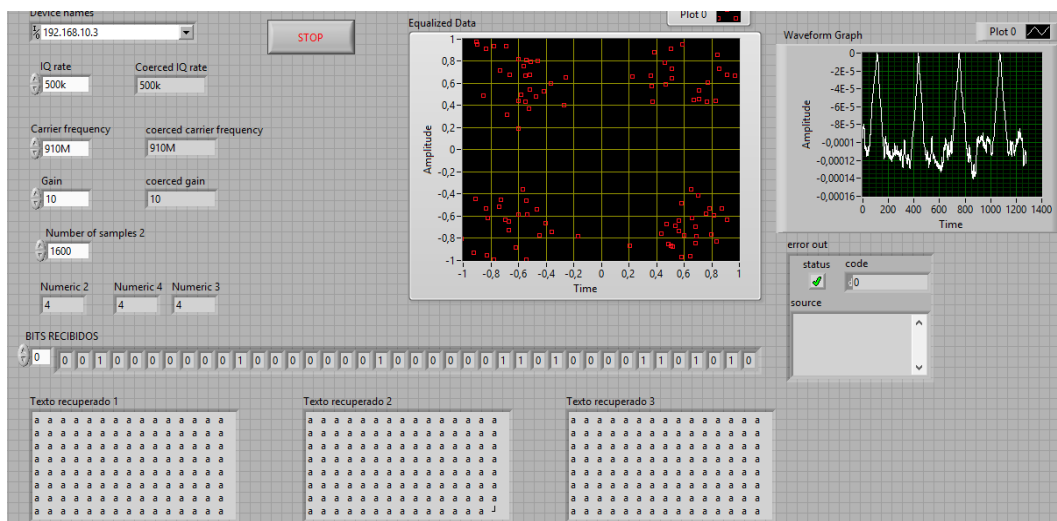


Ilustración 43: Implementación de la prueba 2 transmisiones de texto sobre receptor LTE-USRP.
Fuente: Desarrollo del proyecto.

8.3.3 Conclusiones.

Analizando los resultados obtenidos se puede afirmar que en este caso la secuencia transmitida se verá alterada directamente por las diferentes condiciones en las que se encuentre el canal, aunque estas alteraciones se intentan corregir en la parte de desarrollo de la estimación del canal que se encuentra en el receptor LTE, algunas alteraciones son tan grandes que esta parte de código no consigue corregir. Aun así se puede aceptar el resultado como correcto debido a que la gran mayoría de las veces el sistema funciona óptimamente y solo en algunas condiciones con un alto volumen de ruido en el canal, el receptor no es capaz de solucionar la alteración.

Capítulo 9. Gestión del proyecto.

9.1 Introducción.

Para el desarrollo de este proyecto se pueden establecer diferentes fases donde se han tomado ciertas decisiones de implementación a fin de establecer un proyecto lo más óptimo y eficiente posible, estas fases son las siguientes:

- Implementación transmisor LTE.
- Implementación receptor LTE.

Las diferentes decisiones de implementación que se van a exponer a continuación se han tomado de acuerdo a su grado de eficiencia y simplicidad que presentaban, así también se ha tenido en cuenta la posibilidad de implementación en entorno real. Este capítulo no solo se va a exponer las diferentes decisiones tomadas durante la implementación del proyecto sino también se explicará la planificación y coste de la realización de este proyecto.

9.2 Implementación transmisor LTE.

Para el desarrollo en software del transmisor LTE se han tomado unas decisiones de implementación frente a otras por motivos de eficiencia y simplicidad en el dispositivo USRP, ya que estos dispositivos tienen unas funcionalidades muy limitadas. En cuanto al desarrollo del transmisor se ha optado por utilizar una constelación 4-QAM frente a otras como puede ser una modulación 16-QAM o 256-QAM por simplicidad de uso a la hora de ejecutar proyecto ya que antes de iniciar la transmisión se debe indicar la posición de los símbolos, el escalado y la amplitud de la componente de cuadratura y fase. Estos parámetros serán más complejos de introducir cuanto más alta sea la modulación o más bits se asocien a cada símbolo. A continuación se toma la decisión de introducir símbolos de referencia para la estimación del canal en vez de utilizar otros mecanismos de estimación de error del canal como puede ser el mecanismo de transmitir antes de iniciar la transmisión de datos una secuencia conocida por transmisor y receptor ya que la inserción de símbolos de referencia permite calcular en el receptor el error variante del canal y corregir cada símbolo en cada momento, en cambio el otro mecanismo corrige todas las secuencias transmitidas a partir del valor de error calculado con la secuencia conocida transmitida al principio de la transmisión de información, este mecanismo aparte de ser más complejo es menos eficiente.

9.3 Implementación receptor LTE.

Para el desarrollo en software del receptor LTE las decisiones que se han tomado en la implementación son las siguientes. Para la detección de las secuencias de transmisión de información se realiza mediante el algoritmo de van de Beek este

algoritmo permite la detección del prefijo cíclico que precede a la secuencia de información buscando la correlación de las muestras, se elige este mecanismo frente a otros ya que este mecanismo no necesita añadir símbolos delante de la secuencia de transmisión para la sincronización lo que se traduce en una mayor eficiencia. Por otro lado también se destaca la estimación del canal en la cual se ha optado por asignar el factor corrector calculado a partir de la modificación de los símbolos de referencia a los cinco símbolos más cercanos a el símbolo de referencia con el objetivo de tener una estabilidad entre la eficiencia de conseguir la corrección que me retorne la misma secuencia que la secuencia original transmitida y la complejidad de no tener que introducir muchos más símbolos de referencia para ajustar mejor la corrección de la secuencia.

9.4 Análisis socioeconómico.

La aparición de la tecnología LTE propició una transformación en el entorno económico y social. En términos económicos mejora el rendimiento de negocio de las empresas debido a que aumentan su productividad un 67 por ciento más que utilizando otro tipo de tecnología, reduce en un 44 por ciento el tiempo empleado en desarrollo de tareas e incrementa las posibilidades de establecer nuevos contratos de negocio en un 79 por ciento., Estas características generarán un aumento en el PIB de los países.

Por otro lado, en términos sociales la aparición de esta tecnología nos proporciona una mejor cobertura ya que la banda de 800 MHz permite un rendimiento mayor de las antenas. Por otro lado, presenta una mayor velocidad de transmisión permitiendo utilizar múltiples servicios como descargar y compartir información, realizar llamadas en streaming o ver televisión en directo.

La implementación la tecnología LTE sobre USRP ampliaría los beneficios generales que contiene la tecnología LTE, ya que la facilidad de transporte del dispositivo USRP permitiría mejorar la calidad de vida de cualquier área geográfica del mundo mediante un coste asequible. En el aspecto económico la implantación de este proyecto en sectores empresarial permitirá a empresas un poco volumen de negocio poder competir con aquellas que presentan mayor volumen de negocio.

Por último, el desarrollo de este proyecto permitirá el despliegue de la tecnología LTE de una manera sencilla, no solo entornos donde se encuentra concentrada la mayor parte de población sino también en áreas menos pobladas como ciertas zonas de África, Asia y América del Sur, lo que provocará un aumento del grado de penetración de este tipo de tecnología y con ello un desarrollo socioeconómico de estas zonas poco pobladas.

9.5 Planificación y costes.

A continuación, se va a destacar los rasgos relacionados con la gestión y el coste del desarrollo de este proyecto.

9.5.1 Organización del proyecto.

Este proyecto presenta una estructura secuencial o en cascada ya que para que una actividad pueda iniciarse debe terminar su predecesora. Las actividades que forman parte de este proyecto son las siguientes:

- 1 Establecimiento de objetivos (18 horas).
- 2 Estudio de implementación (40 horas).
- 3 Posible propuesta a desarrollar (25 horas).
- 4 Estudio de la viabilidad de la propuesta (20 horas).
- 5 Desarrollo del software del transmisor LTE (60 horas).
- 6 Desarrollo del software del receptor LTE (70 horas).
- 7 Establecer las pruebas del software implementado (42 horas).
- 8 Evaluación de las pruebas realizadas (20 horas).
- 9 Adaptación del software transmisor LTE y receptor LTE a los dispositivos USRP (55 horas).
- 10 Pruebas del software en dispositivos USRP (42 horas).
- 11 Evaluación de las pruebas finales (35 horas).
- 12 Documentación del proyecto (25 horas).

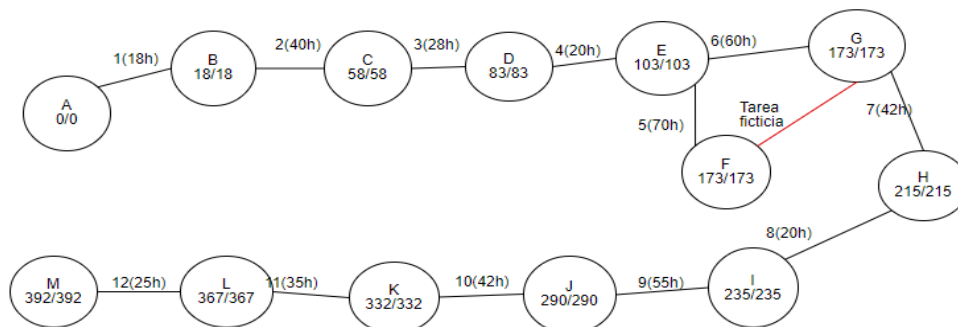


Ilustración 44: Planificación del proyecto (Pert).
Fuente: Desarrollo del proyecto.

Se puede observar que el camino crítico corresponde con las actividades 12-11-10-9-8-7-6-4-3-2-1 siendo 385 horas de duración.

9.5.2 Costes del proyecto.

Para la implementación del receptor y transmisor LTE en el lenguaje de programación Labview sobre dispositivos USRP, se han de tomar en cuenta las siguientes consideraciones.

9.5.2.1 Coste de Personal.

Para el desarrollo de las diferentes tareas establecidas se necesita una serie de personal cualificado.

Reparto de tareas de los miembros relacionados con este proyecto.	
Tutor del trabajo final de grado	Alumno
Jefe de Proyecto	Gestor de Calidad
	Desarrollador
	Analista de datos

Tabla 2: Reparto de tareas de los miembros relacionados con este proyecto.

En cuanto a sueldo el Jefe de proyecto será de 50 euros la hora mientras que el alumno por realizar las tareas de Gestor de Calidad, Desarrollador y Analista de datos es de 40 euros la hora. Calculando el coste total de gasto de personal de acuerdo a la duración del proyecto.

Actividades	Personal	Precio/hora	horas
Establecimiento de objetivos	Jefe de Proyecto (tutor).	50	18
Estudio de implementación	Analista de datos (alumno).	40	40
Posible propuesta a desarrollar	Analista de datos (alumno).	40	25
Estudio de la viabilidad de la propuesta	Jefe de Proyecto (tutor).	50	20
Desarrollo del software del transmisor LTE	Desarrollador (alumno)	40	60
Desarrollo del software del receptor LTE	Desarrollador (alumno)	40	70
Pruebas del software implementado	Gestor de Calidad(Alumno)	40	42
Evaluación de las pruebas realizadas	Gestor de Calidad(Alumno)	40	20
Adaptación del software a los dispositivos USRP	Desarrollador (alumno)	40	55

Pruebas del software en dispositivos USRP	Gestor de Calidad(Alumno)	40	42
Evaluación de las pruebas finales	Jefe de Proyecto (tutor).	50	35
Documentación del proyecto	Analista de datos (alumno).	40	25
Total		18.810euros	452 horas

Tabla 3: Duración, asignación y coste de las actividades de este proyecto.

9.5.2.2 Coste de equipos.

Para la realización de este proyecto se necesita un conjunto de materiales para el correcto desarrollo del mismo.

Materiales	Número de unidades	Precio cada unidad (€)
Dispositivos USRP	2	7.000
Analizador vectorial de señales	1	150.000
Ordenador	1	800
Total	4	164.800 euros

Tabla 4: Coste de equipos en este proyecto.

Asumimos que la amortización es 0.15 del total de costes materiales, equivale en este caso 23.670 €.

9.5.2.3 Coste de licencias.

Para la implementación de la tecnología LTE se utiliza el lenguaje de programación Labview, la licencia de este programa tiene un precio de 5.747€al año el paquete profesional.

9.5.2.4 Costes Indirectos.

En este apartado se destaca un conjunto de costes que afectan en la realización de este proyecto como son los siguientes.

Costes Indirectos	Precio(€)/mes
Alquiler del edificio	900
Luz	99
Agua	58
Acceso a Internet	66
Seguro a todo riesgo	221

Limpieza	130
Total	1.474euros/mes

Tabla 5: Costes indirectos en este proyecto.

9.5.2.5. Coste total.

Para el cálculo el precio final del proyecto se debe tener en cuenta todos los costes enumerados anteriormente y teniendo en cuenta que se aplicara sobre algunos de ellos un gravamen del 21% correspondiente al I.V.A.

Costes generales.	Precio total euros
Coste de personal.	18.810 €
Coste de licencias.	5.747 €
Coste amortización	23.670 €
Costes Indirectos.	1.474 €
Total sin I.V.A	49.428 €

Tabla 6: Coste total de este proyecto.

Capítulo 10. Conclusiones.

10.1 Aspectos más reseñables.

Una vez realizado este proyecto se puede destacar una serie de declaraciones sobre la implementación del transmisor y receptor basado en la tecnología LTE mediante el lenguaje de programación Labview sobre dispositivos USRP. En primer lugar, la utilización del lenguaje de programación Labview para el desarrollo del software es una muy buena opción ya que ha quedado demostrado que este tipo de lenguaje de programación es un lenguaje fácil de trabajar, la programación se realiza mediante el cableado de diferentes iconos gráficos (funciones). Las funciones que presenta Labview y que le hace ideal para esta implementación de la tecnología LTE es el rápido procesamiento y análisis de las señales, el análisis de los datos unido con la captación de los mismos hace diferenciarse entre el resto de lenguajes de programación ya que se ha desarrollado desde su origen para realizar múltiples tareas a la vez. También mencionar de acuerdo al uso de dispositivos USRP como soporte hardware del software implementado se puede decir que estos dispositivos son óptimos para implementación de sistemas de comunicación debido a tiene capacidad de operación en varias bandas de frecuencia, presenta compatibilidad con otros varios softwares de simulación, permite variar la potencia, tiene una gran capacidad de procesado y un sistema de interconexión con otros dispositivos sencilla, mediante Ethernet.

Por otro lado, analizando los objetivos fijados al inicio de la realización del proyecto se puede afirmar que se ha conseguido cumplir con ellos consiguiendo.

- Analizar el entorno del que parte el proyecto donde se ha estudiado que tipos de tecnologías predecesoras existen, que hizo aparecer la tecnología LTE que se quiere implementar, qué características tiene la tecnología LTE, así como el marco legislativo que envuelve la realización del proyecto. También establecer de forma clara los resultados a tener al final del proyecto.
- Desarrollar el software de un transmisor y receptor en el lenguaje de programación Labview.
- Adaptar el software implementado a los dispositivos de software libre USRP observando que modificaciones hay que realizar para su ejecución y ajustarlo a las especificaciones del dispositivo.
- Establecer las pruebas necesarias para el análisis de funcionamiento del software implementado, observando su correcto funcionamiento y a continuación analizando hasta donde es posible funcionar correctamente variando los parámetros de configuración del dispositivo USRP.

- Establecer un coste de desarrollo asequible para que puedan implementarlo tanto empresas pequeñas como grandes y una implementación en menos de un año.

Entrando en el resultado de las pruebas realizadas en este proyecto se puede considerar:

- La implementación realizada presenta un funcionamiento óptimo en el entorno desplegado sin embargo en entornos con un canal que presenta grandes variaciones de ruido presenta dificultades de corrección de la secuencia original por parte del receptor ya que no se puede aproximar que el factor de modificación del símbolo de referencia coincide con sus cinco símbolos cercanos.
- La utilización del método de Van der Beek para sincronismo es más eficiente y optima que otros mecanismos ya que no necesita de transmisión de símbolos extra de detección cargando a la transmisión de mayor complejidad.

Para concluir se puede afirmar que los dispositivos USRP permiten desarrollar algunas características del estándar de la tecnología LTE como por ejemplo el tipo de modulación empleada o los canales lógicos. Sin embargo, presenta ciertos problemas a la hora de alcanzar el ancho de banda requerido por el estándar del 3Gpp, aun así, se puede considerar que estos dispositivos son ideales para implementar tecnologías móviles permitiendo desarrollar con pocos recursos un servicio de telefonía móvil.

10.2 Futuras vías de investigación.

Una vez desarrollado de manera exitosa la implementación básica de la Tecnología LTE sobre dispositivos USRP se abren nuevas líneas de investigación basadas fundamentalmente en la optimización del software y el desarrollo de las partes del estándar que no han sido implementadas.

Dentro de la optimización del software se pueden desarrollar nuevos mecanismos más fiables para la detección del prefijo cíclico y para la estimación del canal que los implementados en este proyecto.

Por otro lado, la implementación de ciertas características pertenecientes al estándar de la tecnología LTE que no han sido implementadas en este proyecto como algunos canales físicos de Control (PCFICH y PHICH).

Bibliografía y referencias.

- [1]. Valencia., U. I. Evolución de la red de comunicación móvil, del 1G al 5G. Retrieved from <https://www.universidadviu.es/evolucion-la-red-comunicacion-movil-del-1g-al-5g/>
[Último acceso: 7 agosto 2018].
- [2]. Fernando Rivero, C. d. Informe Mobile en España y el Mundo 2018. Retrieved from https://mktefa.ditrendia.es/hubfs/Ditrendia-Informe%20Mobile%202018.pdf?t=1532079210754&utm_campaign=Informe%20Mobile%202018&utm_source=hs_automation&utm_medium=email&utm_content=64334773&_hsenc=p2ANqtz--cx3JSF8KsY23QL5n_hdEfexpA53INssRdwpW2vGb0GDM4dsTbTy0
[Último acceso: 25 Agosto 2018].
- [3]. Association, G. G. Global number of LTE subscribers grows by almost a billion in the last year. Retrieved from <https://gsacom.com/press-release/global-number-of-lte-subscribers-grows-by-almost-a-billion-in-the-last-year/>
[Último acceso: 25 agosto 2018].
- [4]. Coss, Y. Tendencia digital y social media, algunas cifras para comenzar el 2018. Retrieved from <https://blog.digimind.com/es/tendencias/tendencias-digitales-social-media-algunas-cifras-comenzar-2018/>
[Último acceso: 8 Agosto 2018].
- [5]. Iedema, M. Getting Started with OpenBTS. Retrieved from http://openbts.org/site/wp-content/uploads/ebook/Getting_Started_with_OpenBTS_Range_Networks.pdf
[Último acceso: 11 Agosto 2018].
- [6]. University of Zambia, L. Z. Open BTS, a GSM experiment in rural Zambia. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/2a8d/68243505daa39badd72b11083369a9419019.pdf>
[Último acceso: 25 Agosto 2018].
- [7]. Genovés Guzmán, B. Implementación de la señalización de una estación base GSM. Retrieved from https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/20167/TFG_Borja_Genoves_Guzman.pdf?sequence=1&isAllowed=y
[Último acceso: 17 Septiembre 2018].

- [8]. Lancho Serrano, A. Implementación de la señalización de una estación de base UMTS. Retrieved from <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/20269#preview>
[Último acceso: 16 Agosto 2018].
- [9]. Alvarez, E. A. (2018, Agosto 16). Recepción de señal LTE mediante técnicas de radio. Retrieved from <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9489/388066.pdf>
[Último acceso: 19 Agosto 2018].
- [10]. Fernández, A. S. Planificación de Sistemas LTE en Autopistas. Retrieved from https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/668358/Sancho_Fernandez_Andrea_tfg.pdf?sequence=1
[Último acceso: 25 Agosto 2018].
- [11]. 3GPP, L. 3rd Generation Partnership Project (3GPP) . Retrieved from <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>
[Último acceso: 16 Agosto 2018].
- [12]. Anónimo. Explicación LTE. Retrieved from <http://www.ipv6go.net/lte/>
[Último acceso: 17 Agosto 2018].
- [13]. Anónimo. SDR ¿Que es SDR? Software Defined Radio. Retrieved from <http://radioaficion.com/mods/ique-es-sdr-software-defined-radio/>
[Último acceso: 17 Agosto 2018].
- [14]. Engineering, E. Radio Definida por Software. Retrieved from <http://www.eqeng.com/site/es/node/38>
[Último acceso: 18 Agosto 2018].
- [15]. Instruments., N. What Is NI USRP Hardware? Retrieved from <http://www.ni.com/white-paper/12985/en/>
[Último acceso: 17 Agosto 2018].
- [16]. Instruments, N. USRP-2920 Specifications - National Instruments. Retrieved from <http://www.ni.com/pdf/manuals/375839c.pdf>
[Último acceso: 18 Agosto 2018].
- [17]. Instruments, N. Los 4 Principales Beneficios de LabVIEW - National Instruments. Retrieved from ftp://ftp.ni.com/pub/branches/latam/2017/Software_Benefits/27578_Software_Benefits_of_LabVIEW_Flyer_2016_ESP_WR.pdf
[Último acceso: 19 Agosto 2018].

- [18]. Ranchal, J. (2018, Agosto 18). ¿Qué es 5G? ¿Cuáles son las ventajas de 5G?
Retrieved from <https://www.muycomputer.com/2017/07/18/ventajas-de-5g/>
[Último acceso: 18 Agosto 2018].
- [19]. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, J. V. Introducción a la Gestión del Espectro Radioeléctrico - COIT. Retrieved from Introducción a la Gestión del Espectro Radioeléctrico – COIT
[Último acceso: 19 Agosto 2018].
- [20]. España, G. d. Ley General de Telecomunicaciones. Retrieved from <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2014-4950>
[Último acceso: 21 Agosto 2018].
- [21]. Europeo, P. Directiva 87/372/CEE . Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM%3A124128>
[Último acceso: 21 Agosto 2018].
- [22]. Europeo, p. Directiva 2009/114/CE. Retrieved from <https://www.boe.es/doue/2009/274/L00025-00027.pdf>
[Último acceso: 21 Agosto 2018].
- [23]. 458/2011, R. D. Gobierno de España. Retrieved from <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-5936>
[Último acceso: 21 Agosto 2018].
- [24]. ETU/1033/2017, O. Gobierno de España. Retrieved from <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2017-12318>
[Último acceso: 25 Agosto 2018].
- [25]. Lázaro, F. Estado del arte e implicaciones de seguridad y provacidad en el internet de las cosas. Retrieved from <https://www.ismsforum.es/estudioCEM>
[Último acceso: 26 Agosto 2018].
- [26]. Guardiola, M. Los nuevos “delitos informáticos” tras la reforma del código penal. Retrieved from <http://www.legaltoday.com/practica-juridica/penal/penal/los-nuevos-delitos-informaticos-tras-la-reforma-del-codigo-penal>
[Último acceso: 26 Agosto 2018].
- [27]. España, G. d. Ley Orgánica 1/2015, de 30 de marzo, por la que se modifica la Ley. Retrieved from <https://www.boe.es/buscar/pdf/2015/BOE-A-2015-3439-consolidado.pdf>
[Último acceso: 26 Agosto 2018].
- [28]. Instruments, N. (2018 agosto,15). NI-USRP Help. Retrieved from <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/373380G-01/>

- [Último acceso: 15 Agosto 2018].
- [29]. Instrument, N. (2018, agosto 17). Manual funciones Labview. Retrieved from <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361P-01/>
[Último acceso: 17 Agosto 2018].
- [30]. Magnus Sandell, Jan-Jaap van de Beek, Per Ola B"orjesson. (2018, Agosto 19). Timing and Frequency Synchronization in OFDM. Retrieved from https://pdfs.semanticscholar.org/7b87/8b93b4d6b22b8f63a2e141d00a8c483b9674.pdf?_ga=2.239480387.1760867271.1535129337-1617769475.1533461556
[Último acceso: 19 Agosto 2018].
- [31]. Internacional Valencia Universidad, Evolución de la red de comunicación móvil del 1G al 5G.
Retrieved from <https://www.universidadviu.es/evolucion-la-red-comunicacion-movil-del-1g-al-5g/>
[Último acceso: 23 Septiembre 2018].

Anexo I. Diccionario de acrónimos.

GSM: Global System for Mobile Communications.

GPRS: General Packet Radio System.

UMTS: Universal Mobile Telephone Service.

LTE: Long Term Evolution.

USRP: Universal Software Radio Peripheral.

SDR: Software Defined Radio.

SMS: Short Message Service.

EDGE: Enhanced Data rates for Global Evolution.

LTE Advanced: Long Term Evolution Advanced.

OpenBTS: Open Source Cellular Infrastructure.

WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

3GPP: 3rd Generation Partner Ship Project.

OFDMA: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access.

SC-FDMA: Single Carrier Frequency Division Multiple Access.

PAPR: Peak-to-average power Ratio.

PRB: Physical Resource Block.

RE: Resource Element.

RSP: Primary Reference Signs.

TS: Temporary Slot.

RSS: Secondary Reference Signals.

FFT: Fast Fourier transform.

IFFT: Inverse Fast Fourier transform.

PSS: Primary Synchronisation Signal.

SSS: Secondary Synchronisation Signal.

PDSCH: Physical Downlink Shared Channel.

PMCH: Physical Multicast Channel.

PBCH: Physical Broadcast Channel.

PDCCH: Physical Downlink Control Channel.

PCFICH: Physical Control Format Indicator Channel.

PHICH: Physical Hybrid ARQ Indicator Channel.

DM-RS: Modulation Reference Signal.

SRS: Sounding Reference Signals.

PUSCH: Physical Uplink Shared Channel.

PUCCH: Physical Uplink Control Channel.

PRACH: Physical Random Access Channel.

EUTRAN: Evolved Radio Access Network.

EPC: Evolved Packet Core.

MME: Mobility Management Entity.

HSS: Home Subscriber Server.

PCRF: Policy and Charging Rules Function.

SGW: Serving Gateway.

PDN Gateway: Public Data Network Gateway.

UE: User Equipment.

FPGA: Field-Programmable Gate Array.

ADC: Analog to Digital Conversion.

DAC: Digital to Analog Conversion.

ITU: International Telecommunications Union.

CEPT: European Conference of Postal and Telecommunications Administrations

CE: European Commission.

ETSI: European Telecommunications Standards Institute.

RSC: Radio Spectrum Committee.

CNAF: Cuadro Nacional de Asignación de Frecuencias.

SETSI: Secretaría de Estado para el Avance Digital Sociedad de la Información.

PERT: Program Evaluation and Review Techniques.

QAM: Quadrature Amplitude Modulation.

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying.

GSA: Global mobile Suppliers Association.

Anexo II. Project Summary.

The emergence of mobile telephony in the late seventies caused an authentic revolution as it allowed a change in many of the habits of society [31]. This change was accentuated with the birth of each of the different mobile generations that were emerging as a result of the increase in the needs of society. The first generation originates around the years 1970 - 1980 and is characterized by presenting an analog modulation. . The use of this technology was strictly for voice. Around 1980 - 1990, the 2nd generation appeared. The main feature of this generation was the use of the digital modulation instead of the analog modulation. As a consequence of this, it presents a more robust security system. On this generation GSM technology stands out. The 2nd generation evolved around 2000-2001 in generation 2.5, which increased the capabilities of the second generation by evolving to packet switching, GPRS technology stands out. Then, around 2002-2003, the 3rd generation appeared. This generation was characterized by the convergence of voice, data and wireless internet access, UMTS technology stands out. Finally, this latest technology evolves in 2010 giving rise to the 4th generation. The 4th generation is characterized by the speed: fifty times greater than the previous one, highlighting LTE technology. This technology has been evolved to comply with several requirements of 3GPP standard, which were not satisfied in the first versions. These changes gave rise to LTE Advanced technology [12]. These evolutions of mobile technology are the result of the growing demand from society for new functionalities, it has been demonstrated in many reports analyzing the degree of penetration of mobile technology in society or the use of mobile devices by part of certain sectors of the population.

During this project, LTE technology will be developed. The main scopes of LTE are:

- Increase in efficiency.
- Compatible with predecessor generations such as GSM / EDGE / UMTS.
- Quality of service.
- Greater mobility.

To implement this type of characteristics, an OFDMA modulation is used in the downlink and an SC-FDMA modulation in the uplink. Regarding the structure of an LTE frame, each frame is composed by 10 subframes, each subframe has 2 slots and each slot can have between 6 and 110 resources block according to the allocation of resources. Finally, each resource block contains 12 subcarriers and it is made up of a set of resource elements. As for the different links (up-link / Down-link), it is composed of different signaling and control mechanisms used to transport information.

In the down-link, it is necessary to note the signals of reference, Timing and Sampling, Channel of synchronism, Physical channels of traffic and Physical channels of Control.

On the other hand, the up-link link highlights the reference signals, the Temporal Advance mechanism and the physical control channels.

Analyzing the architecture of the LTE technology, it is possible to determine that LTE is formed by elements of control and classification. The control elements include Mobility Management Entity and Home Subscriber Server. These elements are in charge of the mobility management and user registration. The classification elements include Policy and Charging Rules Function, Serving Gateway and Public Data Network Gateway, these elements are responsible for implementing management and connectivity policies.

To develop the software of the LTE technology, the Labview programming language is used in front of others such as Matlab or Python, because Labview is a graphic programming language that makes use of data flow models instead of sequential execution threads and It presents some advantages:

- It is easy to use because it allows to perform developments that in other languages are bulky in a graphical and simple way.
- It, allows to execute in a simple way multiple simultaneous tasks which, can work in different hardware supports on the same software, automatically generates code and presents an easy-to-use interface.

For the development of this technology, a series of functions are used in order to be able to modify the data in a simple way. In this development, it is necessary to highlight two parts: the LTE transmitter and the LTE receiver.

The purpose of the LTE transmitter is to generate a map of symbols from the input parameters that are provided. After that, symbol is associated to each set of information bits according to the modulation assigned, for example 4-QAM, 16-QAM or 16-QPSK, Once the symbols are generated, the transmitter generates OFDMA symbols from the sequence of symbols originated by the association of the information bits to symbols.

After generating reference symbols, they are inserted in the sequence of symbols that make up the OFDMA symbol.

The next step is to insert null samples at the ends of OFDMA symbols to avoid interference at the channel boundaries. On this step the transmitter has the information that will be sent. To send it, the transmitter applies a, Fourier transform to convert the sequence containing the information symbols and reference symbols (frequency) into time samples.

Finally, the cyclic prefix is inserted. This process consists of copying the last time samples belonging to the sequence of the Fourier transform and inserting them at the beginning of the sequence and finally scaling the signal.

In order to detect this cyclic prefix, the LTE receiver needs to implement Van Dee Beek algorithm [30]. This algorithm allows the receiver to determine the samples of the cyclic prefix of each OFDMA symbol and remove them. Once cyclic prefix samples are removed, the null symbols that have been inserted into the ends of each OFDMA symbol

are removed. Then, the reference symbols which have been added in the OFDMA symbols are extracted.

At this point, the transmitter evaluates the possible modifications that are made by the channel generating a sequence which will be used to correct the possible modifications on the symbols. Finally, the information bits associated with each symbol are obtained as a function of the symbol map generated by the input parameters provided.

Once the transmitter and receiver are implemented, this implementation needs to be adapted to work with USRP devices [14]. This kind of devices belongs to the set of equipment known as SDR (Radio Defined by Software). These devices implement communication systems where their components are developed in software. SDR equipments present different advantages such as multiple modes of operation, reconfiguration and lower development cost.

However, focusing on USRP devices, we point out that they are software-based communication devices which are capable of receiving and transmitting signals in different frequency bands. This is possible because this device consists of a set of printed circuits that allow the device to be converted into amateur radio, mobile telephony or Bluetooth stations. The USRP were designed to have accessibility and therefore are open software devices, these teams are formed by a motherboard where some systems operate such as clock synchronization, FPGA, ADC, DAC, power regulation, interface and USRP processor.

To adapt the LTE transmitter implemented in Labview on USRP devices, it is necessary to add the following processes [28]:

- Open a USRP session: In order to use the software implemented on the USRP devices, it is necessary to establish a session on which the transmission is operated.
- Session configuration of the USRP device: Once the session is generated, it is necessary to configure the transmission parameters. The input parameters are: the IQ rate whose value is 5MHZ, carrier frequency whose value is 600MHz, gain whose value is 8 and activate antenna whose value is TX, thus indicating that the device is a transmitter.
- Write the data in the channel: Once the parameters of the transmission are configured, the data is written in the channel.
- Close a USRP session: The USRP session closure is performed in order to release the device.

As regards the adaptation of the LTE receiver implemented in Labview on USRP devices, the following functions must be added [28]:

- Open a USRP session: In order to implement the LTE receiver on USRP devices, it is necessary to generate a reception session.
- Session configuration of the USRP device: The reception parameters of the LTE receiver are configured. The input parameters must match those of the transmitter by changing only the active antenna parameter whose value is RX, thus indicating that the device is a receiver.
- Start data reception: Data reception is initialized.
- Read channel data: Once the reception is started, the channel data is read.
- Stop reception: Once the end of the reception of information is considered, the receiver is stopped.
- Close a USRP session: The USRP session closure is performed in order to release the device.

As soon as the receiver and transmitter were adapted, they were tested. The scope of the tests is to check and analyze the following points.

- Consistent operation of the LTE transmitter.
- Consistent operation of the LTE receiver.
- Analyze if it meets the specifications defined by the LTE standard.

To achieve this scope, there were performed the following tests:

- Transmit numerical values. In this test 375 users transmit 8-bit data at the same time. However, in this test, the validation focuses only in 7 users which modify the data that they transmit and rest of users generates, random data.
- Transmit text in ASCII codification. The validation of this test will focus only on 3 of the 375 users that the implementation supports, being the data of the remaining users generated randomly as previous test.

To check if the implementation of LTE technology performed in this project works properly, the tests in each of the proposed environments will be repeated a hundred times, starting from the simplest environment (SimuladorLTE) which is independent of the device and finally on the most complex environment (LTE transmitter and LTE receiver) whose implementation is adapted to USRP devices.

To analyze the different tests in each of the environments, there will be used the following KPIs (Key Performance Indicator):

- First environment (SimuladorLTE.vi):
 - BER (Bit Error Rate)
 - Number of failed transmitted values

- Second environment (transmisorLTE.vi and receptorLTE.vi):
 - Number of failures of transmitted values

According to the results of the tests in the first environment, it can be affirmed that the results are very satisfactory and that they are coordinated with the expected results. This is due to the fact that when connecting the code of transmitter and the receiver in software as it was developed in the SimuladorLTE.vi project, there is no presence of any channel that alters the sequence that is being transmitted. Therefore the Bit Error Rate must be zero and the text should be recovered without any problem.

Regarding the second environment, it can be affirmed that, in this case, the transmitted sequence will be directly altered by the different conditions in which the channel is found. Although these alterations are corrected in the channel estimation, some alterations are so large and this implementation can not be corrected. However, the result can be accepted as correct because the vast majority of the time the system works optimally.

Finally, it can be said that the objectives of this project have been achieved, due to the following reasons:

- The study of the environment from which the project starts and the definition of the different theoretical specifications that the project explained in chapter two must fulfill.
- Implementation of transmitter and receiver software based on LTE technology on the Labview programming language explained in chapter four.
- Adaptation of the LTE transmitter and receiver software to the USRP devices explained in chapter five.
- Realization of a set of tests for the analysis of the developed software, explained in chapter six.
- Analysis of the results obtained from the realization of the tests, explained throughout chapter seven.
- Estimation of costs and project documentation, explained in chapter eight.

Analyzing the objectives achieved, it can be concluded that the Labview programming language is efficient to implement communication systems and that the USRP devices allow to develop some characteristics of the LTE technology standard such as the type of modulation used or the logical channels.

However, it has certain problems when it comes to reaching the bandwidth required by the 3Gpp standard. Even though, it can be considered that these devices are ideal for implementing mobile technologies, allowing the development of a mobile telephone service with fewer resources.

